



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE FADIGA MULTIAXIAL**

Por  
**Guilherme Oliveira Roquete**

**Brasília, 28 de Novembro de 2014**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE FADIGA MULTIAXIAL

POR

**Guilherme Oliveira Roquete**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora**

Prof. Edgar Nobuo Mamiya, UnB/ ENM (Orientador)

\_\_\_\_\_

Prof. Lucival Malcher, UnB/ ENM

\_\_\_\_\_

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM

\_\_\_\_\_

Brasília, 28 de Novembro de 2014

## **Dedicatória**

*Dedico esse trabalho à minha família, que sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida. Dedico também à minha namorada, que me apoiou e foi paciente ao longo de todo o processo.*

*Guilherme Oliveira Roquete*

## **Agradecimentos**

*Agradeço primeiramente à minha família, que sempre esteve presente em todos os momentos da minha vida, principalmente nos mais difíceis dando todo o suporte para poder seguir em frente. Agradeço também ao professor Edgar Mamiya, que deu a oportunidade da realização deste trabalho e que sempre esteve a disposição para orientação. Finalmente, agradeço ao João Sahadi, Hélio Queiroz e ao professor Edson por toda a disposição nas etapas de realização deste trabalho.*

*Guilherme Oliveira Roquete*

---

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o projeto, a fabricação e a qualificação metrológica de corpos de prova para ensaios de fadiga multiaxial tração-torção. O carregamento de tração-torção, proporcional ou não proporcional, está presente em vários elementos de máquinas, mas diversos aspectos do comportamento mecânico de metais sob tais esforços ainda necessitam de um estudo mais detalhado. Existem dois tipos básicos de corpos de prova para ensaios do tipo tração-torção: corpo de prova de seção cheia e corpo de prova tubular de parede fina. Cada tipo de corpo de prova tem suas vantagens e desvantagens listadas no presente trabalho. Dimensões para o corpo de prova tubular foram escolhidas em observância às dimensões sugeridas pela norma ASTM-E2207, levando em consideração as máquinas que serão disponibilizadas para a realização dos ensaios de fadiga. Detalhes de fabricação e, posteriormente, qualificação metrológica dos corpos de prova também são discutidos.

---

## ABSTRACT

This study aims the design, fabrication and metrological qualification of axial-torsional fatigue testing specimens. Proportional and non-proportional axial-torsional loadings are frequently observed in many machine components, but a more detailed study on many aspects of the mechanical behavior of metals subjected to such conditions is required. There are two basic kinds of axial-torsional testing specimens: round solid and thin-walled tubular specimens. Each kind of specimens has its advantages and disadvantages mentioned in this study. Dimensions for the thin-walled tubular specimens were chosen in agreement of the ASTM-E2207 standard practice's suggested dimensions, considering the available machines for the realization of fatigue testing. Fabrication procedures as well as metrological qualification are also addressed.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ASPECTOS GERAIS .....	1
1.2 OBJETIVO.....	1
1.3 HISTÓRICO.....	1
1.4 METODOLOGIA .....	2
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	2
2.1 NORMAS DA ASTM .....	3
2.1.1 ASTM E2207 .....	3
2.1.2 ASTM E606 .....	9
<b>3 MÁQUINAS DE ENSAIO DE FADIGA MULTIAXIAL.....</b>	<b>10</b>
3.1 ESPECIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS DE ENSAIO MTS .....	10
<b>4 TIPOS DE CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>12</b>
4.1 PRINCIPAIS DIFERENÇAS .....	12
4.2 CORPO DE PROVA TUBULAR DE PAREDE FINA .....	14
4.2.1 DIMENSIONAMENTO.....	14
4.2.3 ESPESSURA DA PAREDE .....	19
4.3 CORPOS DE PROVA DE SEÇÃO CHEIA .....	21
4.3.1 INTRODUÇÃO.....	21
4.3.2 PROJETOS .....	21
<b>5 FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA .....</b>	<b>25</b>
5.1 FABRICAÇÃO .....	25
5.2 QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA.....	33
<b>6 ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>38</b>
6.1 ENSAIOS .....	38
6.2 RESULTADOS .....	41
6.2.1 ENSAIOS MONOTÔNICOS .....	41
6.2.2 ENSAIO DE DUREZA .....	43
6.2.3 ENSAIOS CÍCLICOS .....	44
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
7.1 CONCLUSÃO.....	49
7.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	49
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carregamentos axiais-torcionais – Fonte (Adaptado de ASTM E2207, 2003) .....	3
Figura 2 - Dimensões do corpo de prova tubular – Fonte (ASTM E2207, 2013).....	5
Figura 3 - Máquina de ensaios de fadiga multiaxiais .....	11
Figura 4 - Distribuição de tensões cisalhantes na seção transversal do corpo de prova: (a) regime elástico linear; (b) regime elasto-plástico; (c) no tubo de parede fina, pode-se considerar distribuição constante de tensão cisalhante nos regimes elástico e plástico. ....	12
Figura 5 - Fluxograma do algoritmo de dimensionamento.....	16
Figura 6 - Desenho do corpo de prova .....	18
Figura 7 - Distribuição linear na parede do corpo de prova tubular (seção transversal) .....	19
Figura 8 - Distribuição constante na parede do corpo de prova tubular (seção transversal) ....	20
Figura 9 - Desenho do corpo de prova de seção cheia .....	21
Figura 10 - Foto do corpo de prova de seção cheia polido .....	22
Figura 11 - Foto do corpo de prova de seção cheia apenas usinado .....	22
Figura 12 - Desenho do corpo de prova de seção cheia e raio único de transição .....	23
Figura 13 - Corpos de prova de seção cheia de diâmetro útil 6,35mm – polidos .....	24
Figura 14 - Corpos de prova de seção cheia de diâmetro útil 6,35mm – usinados .....	24
Figura 15 - Torno CNC utilizado na fabricação dos corpos de prova tubulares.....	25
Figura 16 - Torno convencional ROMI modelo TORMAX 20 .....	26
Figura 17 - Dimensões do corpo de prova tubular fabricado.....	26
Figura 18 - Alargador helicoidal DIN-212d utilizado na fabricação .....	27
Figura 19 - Fixação para torneamento externo .....	28
Figura 20 - Corpo de prova tubular após usinagem no torno CNC.....	28
Figura 21 - Programa utilizado no torno CNC.....	29
Figura 22 - Ferramenta de brunimento - <i>Flex Honing</i> .....	30
Figura 23 - Régua diamantada em alargadores expansivos .....	30
Figura 24 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (1).....	31
Figura 25 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (2).....	31
Figura 26 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (3).....	32
Figura 27 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (4).....	32
Figura 28 - Corpo de prova tubular usinado .....	33
Figura 29 - Equipamento utilizado para medição de rugosidade – Rugosímetro digital MITUTOYO – SJ201 .....	35
Figura 30 – Máquina projetor de perfil utilizada para a medição dos arcos de circunferência	36
Figura 31 - Corpo de prova tubular com problema de flambagem .....	39
Figura 32 - Corpo de prova com defeito de amassamento nas garras .....	39
Figura 33 - Corpo de prova com quebra em na área da garra.....	39
Figura 34 - Estado plano de tensões .....	40
Figura 35 - Gráfico Tensão x Deformação - Primeiro ensaio monotônico de tração .....	42
Figura 36 - Gráfico Tensão x Deformação – Segundo ensaio monotônico de tração.....	42
Figura 37 - Foto do corpo de prova fraturado – Primeiro ensaio monotônico de tração.....	43
Figura 38 - Foto do corpo de fraturado - Segundo ensaio monotônico de tração.....	43
Figura 39 - Foto da máquina de ensaio de dureza Brinell - ZWICK/ROELL - ZHU 250 .....	44
Figura 40 - Foto do corpo de prova fraturado (polido) – Primeiro ensaio de fadiga axial.....	45
Figura 41 - Foto do corpo de prova fraturado (usinado) – Segundo ensaio de fadiga axial.....	46
Figura 42 - Foto do corpo de prova fraturado (usinado) – Terceiro ensaio de fadiga axial .....	46
Figura 43- Foto do corpo de prova fraturado (polido) – Quarto ensaio de fadiga axial.....	47
Figura 44 - Foto do corpo de prova fraturado (polido) – Ensaio de fadiga multiaxial .....	48
Figura 45 - Foto do corpo de prova fraturado (usinado) – Ensaio de fadiga multiaxial .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre as dimensões do corpo de prova tubular de parede fina .....	5
Tabela 2 - Principais especificações das máquinas de ensaio MTS .....	10
Tabela 3 - Exemplo da planilha de dados .....	15
Tabela 4 - Dimensões do corpo de prova tubular.....	17
Tabela 5 - Rugosidade superficial do corpo de prova seção cheia 10mm - usinado.....	34
Tabela 6 - Rugosidade superficial do corpo de prova seção cheia 10 mm - polido.....	34
Tabela 7 - Rugosidade superficial do corpo de prova de seção cheia 6,35mm - usinado .....	35
Tabela 8 - Rugosidade superficial do corpo de prova de seção cheia 6,35mm - polido .....	35
Tabela 9 - Medições dos corpos de prova de seção cheia 6,35mm.....	36
Tabela 10 - Diâmetro da seção útil dos corpos de prova usinados .....	37
Tabela 11 - Diâmetro da seção útil dos corpos de prova polidos.....	37
Tabela 12 - Amplitude de tensões para os ensaios mecânicos.....	41
Tabela 13 - Amplitude de Tensões normais e cisalhantes - Ensaios cíclicos axiais .....	45
Tabela 14 - Amplitude de Tensões normais e cisalhantes - Ensaios cíclicos multiaxiais .....	47

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$t$	Espessura da parede na seção útil	[mm]
$d_o$	Diâmetro externo na seção útil	[mm]
$d_i$	Diâmetro interno do tubo	[mm]
$d_G$	Diâmetro externo da extremidade do espécime	[mm]
$c$	Chanfro a 45°	[mm]
$R$	Raio de transição	[mm]
$L$	Comprimento total	[mm]
$L_G$	Comprimento da seção da garra	[mm]
$L_{GT}$	Comprimento da seção da garra e transição	[mm]
$L_s$	Comprimento da seção reta no meio do corpo de prova	[mm]
$L_g$	Comprimento da seção útil no meio do corpo de prova	[mm]
$E$	Modulo de Elasticidade	[GPa]
$S_y$	Limite de Escoamento	[MPa]
$H_B$	Dureza Brinell	
$J$	Segundo momento polar de área	[m <sup>4</sup> ]

## Símbolos Gregos

$\epsilon$	Deformação normal total	
$\epsilon_e$	Deformação normal elástica	
$\epsilon_p$	Deformação normal plástica	
$\sigma$	Tensão normal	[MPa]
$\tau$	Tensão cisalhante	[MPa]
$\gamma$	Deformação cisalhante total	
$\gamma_e$	Deformação cisalhante elástica	
$\gamma_p$	Deformação cisalhante plástica	
$\phi$	Ângulo de fase	[°]
$\sigma'$	Tensão de von Mises	

## Subscritos

$o$	outer
$G$	grip
$g$	gage
$a$	alternada

## Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
GFFM	Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ASPECTOS GERAIS

Grande parte dos elementos de máquinas está submetida à aplicação de carregamentos cíclicos, menores do que o limite de ruptura do material, porém, por sua repetitividade, causam danos acumulativos, e são responsáveis por grande parte das falhas mecânicas, levando esses elementos mecânicos a falharem por fadiga. Frequentemente esses carregamentos podem ser multiaxiais, como em um eixo, elemento comum em máquinas, submetido a esforços cíclicos cisalhantes e normais.

## 1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como propostas o projeto, a fabricação, a qualificação metrológica de corpos de prova à serem utilizados em ensaios de fadiga multiaxial.

## 1.3 HISTÓRICO

No contexto de fadiga multiaxial, diversas teorias foram propostas no sentido de descrever de maneira satisfatória o comportamento à fadiga sob carregamentos multiaxiais. Entre estas, destacam-se os modelos baseados no conceito de plano crítico (Brown e Miller (1973), Fatemi e Socie (1988), Smith, Watson e Topper (1970), entre outros), e os modelos baseados em invariantes de tensão ou de deformação (Sines (1959), Dang Van (1993), Papadopoulos (1997)).

O Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade de Brasília tem se dedicado ao desenvolvimento de novos modelos de estimativa de vida ou de resistência à fadiga, no contexto multiaxial, ao longo da última década. O grupo deu os primeiros passos para a proposta de uma medida de amplitude combinada de tensão ao demonstrar (Mamiya e Araújo (2002)) a invariância de quantidades associadas a envelopes prismáticos relacionados a trajetórias elípticas. Tal medida de amplitude combinada tornou-se base da proposta de modelos para a descrição de limites de resistência à fadiga (Mamiya, Araújo e Castro (2009)), vida à fadiga baseada em medidas de tensão (Mamiya et al. (2011)), e vida à fadiga baseada em medidas de deformação (Mamiya et al. (2014)). Cabe salientar que os modelos desenvolvidos pela equipe da UnB no contexto de fadiga multiaxial têm sido validados, até o presente momento, confrontando-os com resultados experimentais disponíveis na literatura. Neste estágio das pesquisas, torna-se imperativa a produção de resultados experimentais próprios, de modo a subsidiar novos avanços nas pesquisas do GFFM. Com esta motivação, a equipe adquiriu duas máquinas de ensaio mecânico tração-torção, cada uma com capacidade de 100 kN à tração/compressão e a 1100 Nm à torção, sendo que uma está sendo instalada e a segunda deve ser entregue ao longo do segundo semestre de 2014.

Quando os carregamentos mecânicos têm amplitudes suficientemente elevadas, observam-se deformações plásticas no material e, nesse contexto, os ensaios de baixo ciclo exigem corpos de prova tubulares de parede fina.

A confecção de tais corpos de prova é bastante complexa, exigindo cuidados extras quando comparados com espécimes empregados em ensaios uniaxiais, pela precisão exigida na realização do furo, a fim de que a parede do corpo de prova tubular seja uniforme e tenha a espessura projetada.

## **1.4 METODOLOGIA**

A primeira fase deste projeto consiste no estudo dos ensaios de fadiga multiaxiais, dos respectivos corpos de prova utilizados e das normas internacionais que padronizam a execução dos ensaios e a fabricação dos corpos de prova.

A partir deste estudo, o dimensionamento dos corpos de prova é realizado. Um processo de fabricação é elaborado para atender às especificações determinadas na fase de projeto dos corpos de prova.

A segunda fase do projeto consiste na qualificação metrológica dos corpos de prova e, de acordo com análise obtida através da qualificação, fazer adaptações nas etapas de confecção, se necessário, com o intuito de se obter etapas consolidadas no processo de fabricação que atendam às especificações das normas e as necessidades dos ensaios mecânicos.

Finalmente, são realizados ensaios mecânicos de fadiga para analisar se os corpos de prova alcançaram os objetivos

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em sete capítulos da seguinte forma: o primeiro capítulo é uma introdução do tema a ser tratado. Contém um breve histórico dos trabalhos realizados, a motivação deste estudo, os objetivos do mesmo e a metodologia usada para atingi-los.

O segundo capítulo é uma abordagem geral das normas da American Society for Testing and Materials (ASTM), a norma ASTM E2207 e a ASTM E606, e as principais recomendações e especificações das mesmas sobre o assunto proposto.

O terceiro capítulo contém informações das máquinas de ensaio de fadiga multiaxial adquiridas. O quarto capítulo descreve os tipos de corpos de prova, e suas respectivas vantagens e desvantagens. Contém uma abordagem de aspectos do processo de dimensionamento e projeto do corpo de prova tubular de parede fina e do corpo de prova de seção cheia. Etapas da fabricação do corpo de prova tubular de parede fina e qualificação dos dois tipos de corpo de prova fazem parte do capítulo cinco. O sexto capítulo faz uma abordagem dos ensaios mecânicos realizados e, no capítulo sétimo, o estudo é concluído.

## 2.1 NORMAS DA ASTM

A ASTM (American Society for Testing and Materials) é uma associação que padroniza testes para materiais a partir de normas, como a norma E2207 para testes multiaxiais de tração torção com corpo de prova tubular e a norma E606 para testes de fadiga uniaxial. Estas normas recomendam alguns cuidados quanto à fabricação e ao acabamento do corpo de prova, com a finalidade de evitar alteração nas propriedades do material e de evitar a iniciação de trincas, facilitada por defeitos superficiais. Este capítulo apresenta um resumo dos pontos mais importantes das normas.

### 2.1.1 ASTM E2207

A norma ASTM-E2207 apresenta uma abordagem geral dos diversos aspectos envolvidos em testes de fadiga de carregamentos axiais e torcionais em fase e fora de fase, com o intuito de levantar as propriedades de fadiga do material sob esses carregamentos multiaxiais. O escopo da norma está restrito a deformações simétricas e ondas de deformações axiais e torcionais com a mesma frequência, totalmente alternadas.

A ASTM-E2207 é aplicável a materiais homogêneos e a uso de corpos de prova tubular de parede fina. A Figura 1 mostra exemplos de ondas em fase e fora de fase nos carregamentos axiais-torcionais de fadiga totalmente alternados. O teste é considerado em fase quando o valor máximo da onda de deformação axial ocorre simultaneamente ao valor máximo da onda de deformação torcional, sendo o ângulo de fase igual a zero ( $\phi = 0$ ). Analogamente, o teste é considerado fora de fase quando o valor máximo da onda de deformação axial não ocorre simultaneamente ao valor máximo da onda de deformação torcional, sendo o ângulo de fase diferente de zero ( $\phi \neq 0$ ).

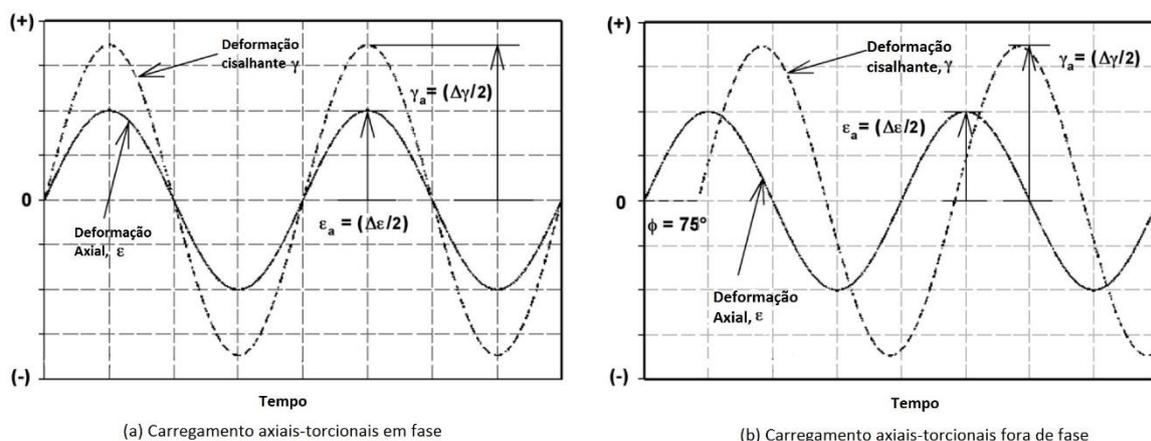


Figura 1 - Carregamentos axiais-torcionais – Fonte (Adaptado de ASTM E2207, 2003)

Ainda no contexto de ensaios de fadiga axial-torcional, a norma recomenda que os aparatos de teste sigam as seguintes especificações:

- Máquinas de testes: Todos os ensaios devem ser realizados em uma máquina de testes com medidores de carga tensão-compressão e torção. O sistema de teste (estrutura e acessórios) deve estar de acordo com o critério de deformação em flexão especificado no método de teste ASTM E606 e prática ASTM E1012. Também deve possuir rigidez lateral e torcional suficiente para minimizar distorções na estrutura de testes na capacidade máxima de carregamento axial e torcional;
- Acessórios de fixação: Os acessórios usados na fixação do corpo de prova devem ser feitos de materiais resistentes, particularmente, a altas temperaturas. O projeto dos acessórios depende fortemente do corpo de prova. Tipicamente, uma combinação de garras hidráulicas e haste lisa do corpo de prova resultam em um bom alinhamento e alta rigidez lateral. Porém, outros tipos de acessórios, como os especificados no método de teste ASTM E606, são também admissíveis, contanto que estejam de acordo com o critério de alinhamento;
- Transdutores de força e torque: A força axial e o torque devem ser medidos por transdutores separados ou um transdutor combinado. A interferência entre a força axial e o torque não pode exceder 1% da escala total de leitura, caso seja usado transdutor simples ou transdutores múltiplos, ou seja, a aplicação da força axial nominal sozinha não deve provocar uma saída de torque maior que 1% do torque nominal, e vice-versa;
- Extensômetros: A deformação axial na seção útil do corpo de prova tubular deve ser medida com um extensômetro do tipo *strain-gaged*, *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), ou um transdutor sem contato (óptico ou capacitivo). A deformação angular na seção útil do corpo de prova tubular deve ser por extensômetro do tipo: *strain-gaged*, *internal Rotary Variable Differential Transformer* (RVDT), ou um sem contato (óptico ou capacitivo). Extensômetros axiais-torcionais podem ser usados, desde que a interferência não seja maior que 1%;
- Calibração dos transdutores: Todos os transdutores devem ser calibrados de acordo com as recomendações dos fabricantes;
- Sistema de aquisição de dados: A aquisição digital de dados é recomendada, ou a aquisição analógica X-Y, e os registros devem documentar os ciclos de histerese e a variação das forças/tensões axiais e torcionais com o tempo.

As relações das dimensões para o corpo de prova tubular, que são recomendadas pela norma, admitem certa variação dimensional, representadas na Fig. 2 e descritas a seguir.

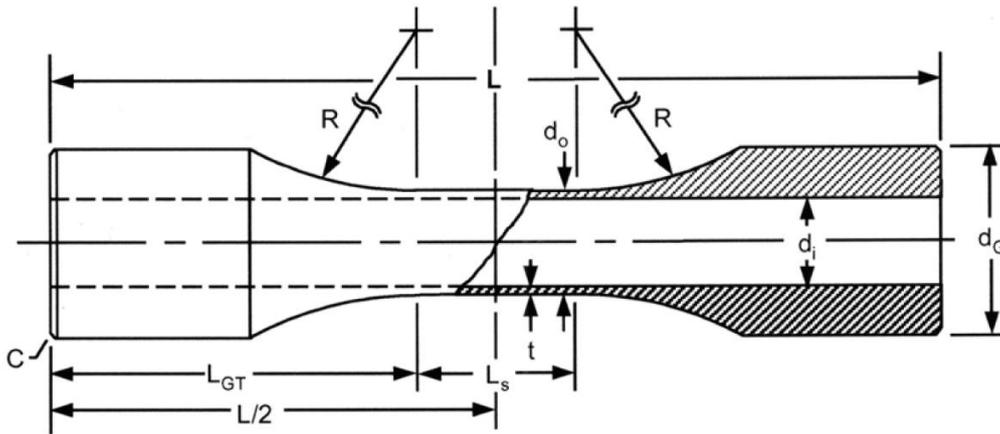


Figura 2 - Dimensões do corpo de prova tubular – Fonte (ASTM E2207, 2013).

As relações entre as dimensões do corpo de prova são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Relação entre as dimensões do corpo de prova tubular de parede fina

Dimensão	Relação
t(espessura da parede na seção útil)	$0.5(d_o - d_i)$
$d_o$ (diâmetro externo na seção útil)	$0.85d_o \pm 0.04d_o$
$d_i$ (diâmetro interno do tubo)	$1.6d_o \pm 0.4d_o$
c(chanfro)	$45^\circ$
L(comprimento total)	$8.5d_o \pm 1.5d_o$
$L_G$ (comprimento da seção da garra)	$2d_o \pm 0.3d_o$
$L_{GT}$ (comprimento da seção da garra e transição)	$3.5d_o \pm 0.5$
$L_s$ (comprimento da seção reta no meio do corpo de prova)	$1.5d_o \pm 0.5d_o$
$L_g$ (comprimento da seção útil no meio do corpo de prova)	$0.9d_o \pm 0.3d_o$
$d_o$ e $d_i$ devem ser concêntricos	$\pm 0.015t$

As dimensões usuais para espessura da parede do corpo de prova devem estar dentro da faixa:

$$t = 2.0 \pm 0.5 \text{ mm} \quad (1)$$

De acordo com a norma, a fabricação do corpo de prova deve seguir as seguintes recomendações:

- Cada passo da usinagem da seção útil deve ser único de uma ponta até a outra ponta do corpo de prova;

- O furo do corpo de prova tubular deve ser brunido, a fim de evitar que trincas iniciem na parte interna do corpo de prova;
- A parte interna e externa da seção útil do corpo de prova devem ter rugosidade superficial,  $R_a$ , menor que  $0.2 \mu\text{m}$ ;
- Todo processo empregado na usinagem do corpo de prova deve atender às especificações do apêndice X3 da norma ASTM E606.

A E2207 recomenda que, após a fabricação do corpo de prova, os diâmetros externo e interno sejam medidos em pelo menos três lugares diferentes da seção útil (uma em cada extremidade e uma no centro). Uma série de três medidas perpendiculares à primeira série de medidas deve ser feita para verificar a concentricidade do corpo de prova tubular. Médias calculadas dessas medidas devem ser usadas para calcular as dimensões do corpo de prova para o teste de controle e processamento de dados pós-testes.

A montagem do corpo de prova na máquina de testes deve ser feita sem submeter o mesmo a alguma pré-carga axial ou torcional. Deve-se tomar cuidado especial em não arranhar a superfície interna ou externa do corpo de prova ao instalar extensômetros ou outra instrumentação qualquer.

Nos casos de ensaios realizados em temperaturas elevadas, o aquecimento do corpo de prova pode ser alcançado com qualquer técnica descrita no método de teste descrito na norma ASTM E606. A temperatura do corpo de prova pode ser monitorada por dispositivos de medição de contato, como o termopar, ou sem contato, como o óptico. A variação de temperatura na seção útil do corpo de prova deve ser menor que 5K ou menor que 1% da temperatura absoluta nominal do ensaio, em Kelvin: o valor que for maior.

A deformação cisalhante, que varia linearmente com o raio através da parede do espécime, deve ser calculada utilizando o diâmetro externo do corpo de prova tubular.

A forma das ondas de comando para deformações axiais e torcionais pode ser do tipo triangular ou senoidal. Para ensaios realizados em temperatura ambiente, a taxa de deformação, para ondas triangulares, ou a frequência, para ondas senoidais, empregada deve ser baixa o bastante para prevenir o aquecimento do corpo de prova devido ao trabalho plástico, isto é, a temperatura não deve aumentar mais que 5K ou 1% da temperatura de teste, o que for maior. Para ensaios multiaxiais fora-de-fase a onda de deformação axial deve anteceder a onda de deformação torcional.

As variáveis de controle (temperatura do corpo de prova, onda axial e torcional) devem ser monitoradas durante o ensaio mecânico. As amplitudes das deformações não podem variar mais que 1% dos valores nominais, e o ângulo de fase para ensaios fora-de-fase não deve variar mais que  $3^\circ$ . A variação da temperatura deve estar restrita dentro de valores já descritos acima.

A força axial, a deformação axial, o torque e a deformação torcional devem ser registrados durante os primeiros dez ciclos do ensaio de fadiga multiaxial para documentar o comportamento do material quanto ao endurecimento/amolecimento cíclico inicial. Posteriormente, esses parâmetros devem ser registrados em intervalos logarítmicos de ciclos.

A definição de falha deve ser precisa no ensaio de fadiga multiaxial. Diferentemente do ensaio de fadiga axial, o corpo de prova pode não se separar em dois pedaços no ensaio de fadiga torcional. Podem ser usados três métodos para o critério de falha: método baseado na queda da porcentagem da força em que considera a falha após uma queda tanto de 5% quanto de 10% da força axial ou torcional; ou método baseado no monitoramento da trinca em que o ensaio é paralisado em intervalos definidos para aplicação de uma substância na superfície do corpo de prova, para posteriormente ser analisado e definir a falha através de trincas de tamanho tanto de 0,1 ou 1,0 mm; ou ainda o método que leva em consideração o endurecimento/amolecimento cíclico do material em que a falha é definida pela interseção da curva da variação da força axial ou torque pelo número de ciclos com uma linha inferior, que é 10% menor que a curva de endurecimento/amolecimento cíclico real e tem uma inclinação idêntica à exibida pelo material durante a maior parte do teste.

O relatório final do ensaio deve conter caracterização detalhada do material, incluindo composição e tratamentos térmicos, detalhes do corpo de prova, como geometria e técnicas de fabricação, e a metodologia do ensaio, incluindo o método utilizado para a definição da falha do corpo de prova. Devem estar incluídos no relatório de dados a temperatura do teste, a frequência ou a taxa de deformação, as amplitudes de deformações axiais e torcionais, e o ângulo de fase entre as ondas de deformação. As curvas de histerese, os picos de tensões em intervalos logarítmicos e a orientação das trincas dominantes que levaram a falha do corpo de prova devem ser documentados.

O comportamento cíclico da deformação e as relações da vida em fadiga para a maioria das ligas metálicas utilizadas em engenharia podem ser obtidos pelas seguintes equações:

A curva de tensão-deformação normal cíclica:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \quad (2)$$

ou

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left( \frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (3)$$

Onde  $\Delta\varepsilon$  representa a variação da deformação normal total, da mesma maneira,  $\Delta\varepsilon_e$  e  $\Delta\varepsilon_p$  representam a variação de deformação normal elástica e plástica, respectivamente. A variação da tensão normal é  $\Delta\sigma$ , E é o módulo de Young, K' é o coeficiente de encruamento cíclico sob carregamentos axiais e n' é o expoente de encruamento cíclico sob carregamentos axiais.

De maneira análoga, a curva tensão-deformação cisalhante cíclica pode ser obtida por meio das expressões:

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\Delta\gamma_e}{2} + \frac{\Delta\gamma_p}{2} \quad (4)$$

ou:

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\Delta\tau}{2G} + \left( \frac{\Delta\tau}{2K'_\gamma} \right)^{\frac{1}{n'_\gamma}} \quad (5)$$

Onde  $\Delta\gamma$  representa a deformação cisalhante total.  $\Delta\gamma_e$  e  $\Delta\gamma_p$  representam a variação da deformação cisalhante elástica e plástica, respectivamente. A variação da tensão cisalhante é  $\Delta\tau$ , G é o módulo de cisalhamento,  $K'_\gamma$  é o coeficiente de encruamento cíclico sob carregamentos torcionais e  $n'_\gamma$  é o expoente de encruamento cíclico sob carregamentos torcionais.

A relação amplitude de deformação-vida (em ciclos) pode ser obtida pela equação:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

Onde  $\sigma'_f$  é o coeficiente de resistência à fadiga sob carregamentos axiais e  $\varepsilon'_f$  é o coeficiente de ductilidade à fadiga sob carregamentos axiais. b e c são os expoentes de resistência à fadiga sob carregamentos axiais e de ductilidade à fadiga sob carregamentos axiais, respectivamente. E é o módulo de Young e  $N_f$  representa o número de ciclos até a falha.  $\Delta\varepsilon$  é a variação da deformação axial.

A relação amplitude de deformação cisalhante-vida pode ser obtida, do mesmo modo, pela equação:

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_\gamma} + \gamma'_f (2N_f)^{c_\gamma} \quad (7)$$

Onde  $\tau'_f$  é o coeficiente de resistência à fadiga sob carregamentos torcionais e  $\gamma'_f$  é o coeficiente de ductilidade à fadiga sob carregamentos torcionais.  $b_\gamma$  e  $c_\gamma$  são os expoentes de resistência à fadiga sob carregamentos torcionais e de ductilidade à fadiga sob carregamentos torcionais, respectivamente.  $G$  é o módulo de cisalhamento e  $N_f$  representa o número de ciclos até a falha.  $\Delta\gamma$  é a variação da deformação cisalhante.

### 2.1.2 ASTM E606

Apesar da norma E606 tratar de teste de fadiga uniaxial, que não pertence ao escopo desse projeto, a norma traz recomendações e especificações que também são válidas na fabricação de corpos de prova tubular para os ensaios de fadiga multiaxiais tração-torção.

No apêndice X3 da norma, descreve-se um exemplo de procedimentos para resultar em um mínimo de dano e alteração superficial, listados a seguir:

- Nos estágios finais de usinagem, remover pequenas quantidades de material, reduzindo o diâmetro útil em 0,125 mm através de retificação cilíndrica, com taxa de, no máximo, 0.005 mm por passada, até faltar 0,025 mm para o diâmetro final;
- Remover os 0,025 mm finais através de polimento longitudinal, resultando em uma rugosidade superficial de no máximo 0,2  $\mu\text{m}$ ;
- Após estes processos, todas as marcas na peça depois do polimento devem ser longitudinais, e nenhuma marca circunferencial deve ser vista quando aumentada em 20x no microscópio óptico;
- Se o material do corpo de prova for dúctil, os processos finais podem ser feitos por meio de torneamento (em vez de retificação) e, posteriormente, polimento;
- O corpo de prova final deve ser desengraxado, tomando cuidado para que o agente químico desengraxante não altere as propriedades do material do corpo de prova;
- Se algum tratamento térmico for necessário, deve-se aplica-lo antes dos estágios finais de usinagem ou realizá-lo em um ambiente inerte a fim de evitar oxidação e danos superficiais;
- Se houver a necessidade da realização de alguma observação na superfície do corpo de prova, essa pode ser feita de acordo com os métodos apresentados na ASTM E3;
- As gravações dos números dos corpos de prova devem ser feitas nos dois lados ao final da seção de testes, em áreas de baixas tensões, longe da área de contato das garras.

# 3 MÁQUINAS DE ENSAIO DE FADIGA MULTIAXIAL

## 3.1 ESPECIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS DE ENSAIO MTS

O Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade de Brasília adquiriu duas máquinas de ensaios mecânicos axiais-torcionais com as principais características descritas na Tab. 2.

Tabela 2 - Principais especificações das máquinas de ensaio MTS

### SISTEMA AXIAL TORCIONAL MTS - 809.10

<b>Capacidade de carga axial</b>	100 kN
<b>Capacidade de carga torcional</b>	1100 Nm
<b>Atuador linear</b>	MTS – modelo 244 com transdutor LVDT
<b>Atuador rotacional</b>	MTS- modelo 215.41 com transdutor ADT
<b>Célula Axial/Torcional</b>	MTS - modelo 662.10 <ul style="list-style-type: none"><li>– Linearidade &lt; 0.15% da escala completa</li><li>– Histerese &lt; 0.10% da escala completa</li><li>– Interferência &lt; 0.5% da escala completa</li></ul>
<b>Controlador</b>	Flex Test 40 – dois canais
<b>Software</b>	Standard Series 793.00
<b>Unidade de força hidráulica</b>	Modelo 505.20 Pressão de operação: 21Mpa
<b>Extensômetro</b>	MTS – modelo 632.80
<b>Garra hidráulica</b>	Modelo 646.10B-11 Diâmetro da garra: 12 mm e 15 mm.

A Figura 3 ilustra a máquina de testes de fadiga multiaxial tração-torção modelo MTS – 809.10 adquirida pelo GFFM.



**Figura 3 - Máquina de ensaios de fadiga multiaxiais – MTS 809.10**

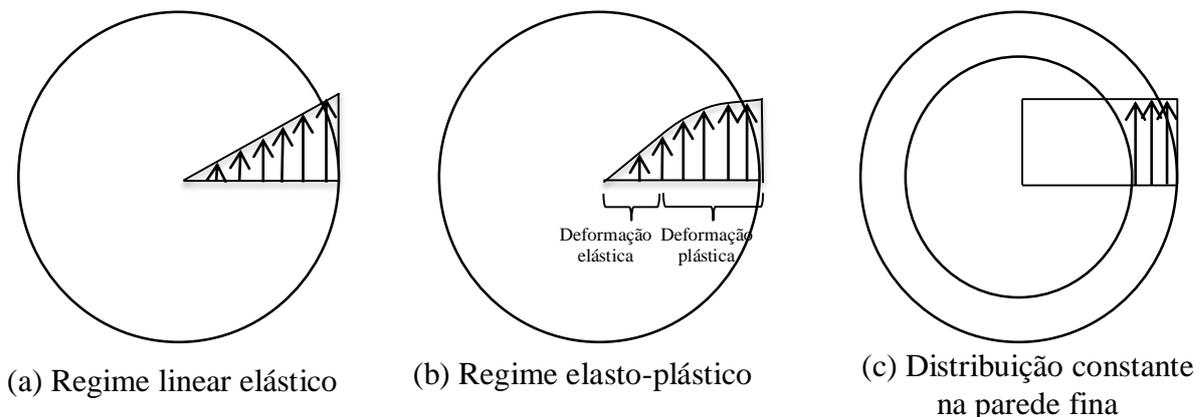
Em função das características das garras que equipam estes equipamentos, os corpos de prova têm suas dimensões limitadas pelo maior diâmetro  $d_g$ , que para um dos equipamentos é igual a 12 mm e para o outro é igual 15 mm.

# 4 TIPOS DE CORPOS DE PROVA

## 4.1 PRINCIPAIS DIFERENÇAS

Existem basicamente dois tipos de corpos de prova de seção circular para a realização de ensaios de fadiga axiais-torcionais: corpo de prova de seção transversal sólida e corpo de prova de seção transversal vazada de parede fina.

Os dois tipos de corpos de prova têm grandes diferenças quanto à aplicabilidade. A grande diferença entre os corpos de prova é percebida quando a tensão de escoamento do material é ultrapassada e o material entra no regime elasto-plástico. Enquanto o material está no regime elástico, a tensão cisalhante devida ao torque aplicado varia linearmente com o raio da seção transversal do corpo de prova. Porém, quando o material entra no regime plástico, a variação da tensão cisalhante não é mais linear, como mostra a Fig. 4 (Souza, 1982). No corpo de prova tubular de parede fina, pode-se admitir uma distribuição de tensão cisalhante constante ao longo da espessura da parede do corpo de prova. Elimina-se, assim, o gradiente de tensão, que não é mais linear e, por se tratar de uma parede fina, o erro associado a tal hipótese é relativamente pequeno. Essa simplificação traz grande vantagem ao cálculo das tensões atuantes e, por isso, é amplamente utilizado em ensaios em que a tensão máxima de cisalhamento ultrapassa o limite de escoamento do material.



**Figura 4 - Distribuição de tensões cisalhantes na seção transversal do corpo de prova: (a) regime elástico linear; (b) regime elasto-plástico; (c) no tubo de parede fina, pode-se considerar distribuição constante de tensão cisalhante nos regimes elástico e plástico.**

Existem modelos para estimar o comportamento da tensão máxima no raio exterior, referente ao regime plástico, a partir da curva de torque em função do ângulo de torção, como o método de Nadai (1950) descrito a seguir:

Considerando a deformação cisalhante  $\gamma$  como sendo:

$$\gamma = r \theta' \quad (8)$$

onde  $r$  é o raio da seção circular e  $\theta'$  é o ângulo de torção por unidade de comprimento:

$$\theta' = \frac{\theta}{L} \quad (9)$$

E o torque aplicado em um corpo de seção circular como sendo:

$$T = 2\pi \int_0^a \tau r^2 dr \quad (10)$$

Assumindo que a tensão cisalhante é função somente da deformação cisalhante, e substituindo a variável  $r$  por  $\gamma$  na equação (10), tem-se que:

$$T\theta'^3 = 2\pi \int_0^{\gamma_a} f(\gamma)\gamma^2 d\gamma \quad (11)$$

sendo  $\gamma_a = a \theta'$ .

Diferenciando a equação (11) em relação a  $\theta'$ :

$$\frac{T\theta'^3}{d\theta'} = 2\pi f(a \theta') a^3 \theta'^2 \quad (12)$$

Quando  $r = a$ , a tensão cisalhante é  $\tau_a = f(a \theta')$ , e essa é a tensão máxima cisalhante. Substituindo e isolando a tensão no raio externo do cilindro, a equação (12) se resume a:

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi a^3} \left[ 3T + \theta' \frac{dT}{d\theta'} \right] \quad (13)$$

A equação (13) foi estendida por Miller e Chandler (1969), com o intuito de gerar a curva tensão-deformação cíclica a partir de dados de testes de fadiga.

McClafin e Fatemi (2004) utilizaram o modelo descrito por Miller e Chandler e concluíram que as tensões calculadas usando aproximação do modelo deram valores de tensão cisalhante maiores do que o esperado, e que, para o regime inelástico, os cálculos para a previsão das tensões no corpo de prova tubular são mais simples e confiáveis.

A desvantagem do corpo de prova tubular e portanto a vantagem da utilização do corpo de prova de seção cheia decorre das dificuldades de fabricação, principalmente pela adequação às tolerâncias geométricas e dimensionais pequenas, no processo de furação do corpo de prova e na confecção da parede fina, o que torna o processo caro. Detalhes sobre a fabricação do corpo de prova tubular de parede fina são discutidos no capítulo seguinte.

## **4.2 CORPO DE PROVA TUBULAR DE PAREDE FINA**

### **4.2.1 DIMENSIONAMENTO**

A maioria das dimensões do corpo de prova tubular de parede fina é função do diâmetro externo da seção útil ( $d_o$ ), como pode ser visto no Capítulo 2 deste trabalho. Contudo, o valor de dimensão limitante do corpo de prova é o diâmetro da garra ( $d_G$ ), pois depende da capacidade das garras das máquinas disponíveis para os ensaios mecânicos.

Foi criado um algoritmo para facilitar as escolhas das dimensões dos corpos de prova garantindo que estejam de acordo com a norma e, ao mesmo tempo, estejam de acordo com as características necessárias para a realização dos testes de fadiga multiaxial tração-torção, a fim de automatizar o processo de dimensionamento do corpo de prova. O fluxograma da Fig. 5 representa o algoritmo.

O valor de entrada para o cálculo das dimensões no algoritmo é o diâmetro da garra ( $d_G$ ), porque é o fator limitante. Após a definição da dimensão do diâmetro da garra, calcula-se o diâmetro externo da seção útil ( $d_o$ ). Após o cálculo de  $d_o$ , pode-se calcular as dimensões sugeridas para os demais parâmetros, podendo admitir certa variação nos valores dentro dos limites inferiores e superiores sugeridos pela norma. Por exemplo, se é de interesse que a parede do corpo de prova seja mais grossa, pode-se diminuir o valor do diâmetro interno ( $d_i$ ) até o limite inferior sugerido pela norma.

Uma planilha de dados foi criada com o algoritmo citado para as escolhas das dimensões do corpo de prova. Com o intuito de verificar se os valores estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma, uma coluna aplica os valores às células: SIM ou NÃO, exemplificada na Tab. 3.

**Tabela 3 - Exemplo da planilha de dados**

<b>Parâmetro</b>		<b>Dimensão</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>De Acordo com a Norma</b>
Diâmetro da garra	dg	12	12	12	<b>SIM</b>
Espessura da parede(usual)	t	0,8	1,5	2,5	<b>NÃO</b>
Diâmetro externo central	do	10	6	10	<b>SIM</b>
Diâmetro interno	di	8,4	8,1	8,9	<b>SIM</b>
Raio de transição	R	32	28	36	<b>SIM</b>
Comprimento total	L	85	70	100	<b>SIM</b>
Comprimento da garra	LG	20	17	23	<b>SIM</b>
Comprimento do fim da transição	Lgt	35	34,5	35,5	<b>SIM</b>
Comprimento da seção do meio	Ls	15	10	20	<b>SIM</b>
Comprimento da seção útil	Lg	9	6	12	<b>SIM</b>
Relação do e t	do/t	12,5	11	17	<b>SIM</b>

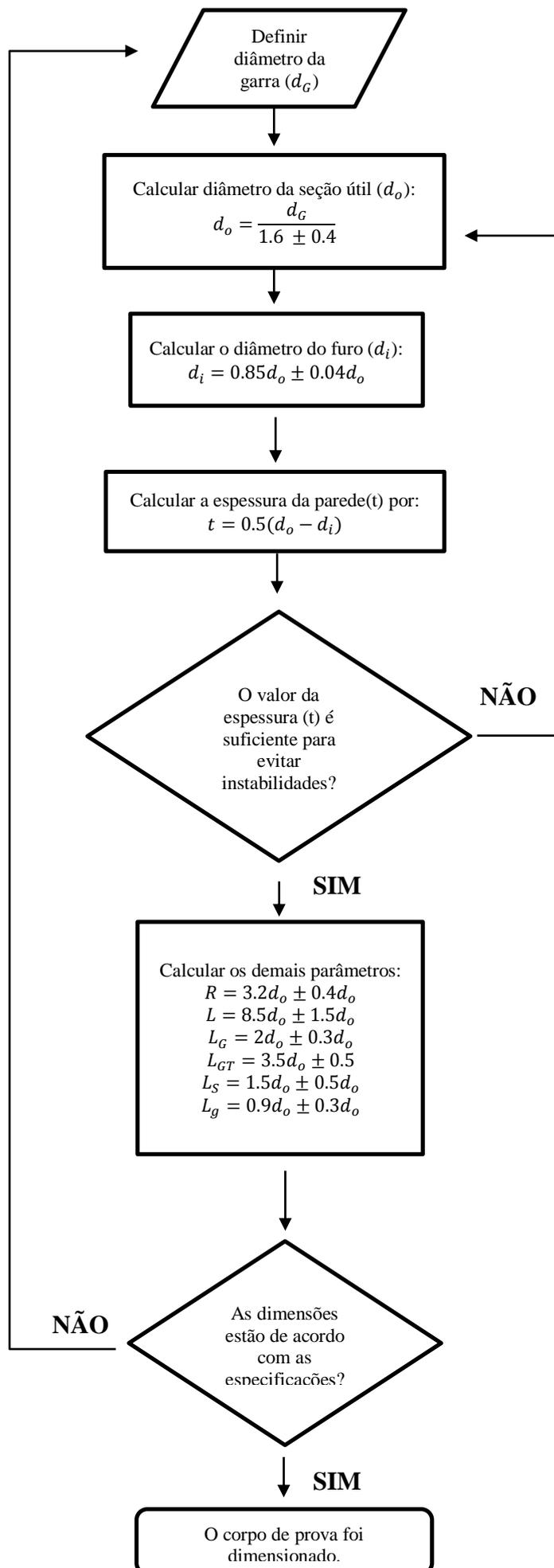


Figura 5 - Fluxograma do algoritmo de dimensionamento

A Tabela 4 mostra as dimensões escolhidas para o corpo de prova tubular de parede fina com o diâmetro de garra de 12 mm. O valor da razão  $\frac{d_o}{t}$  é de 12.5, como se pode observar na tabela, fazendo com que o corpo de prova esteja dentro do critério de parede fina para corpos de prova tubulares, e a escolha do parâmetro  $d_o$  foi pelo feito limite superior, na tentativa de aumentar o valor da espessura da parede, tornar o corpo de prova menos instável e facilitar o processo de fabricação. Dadas as dimensões do corpo de prova, não foi possível ao corpo de prova possuir a parede nas dimensões usuais segundo a norma ASTM E2207.

**Tabela 4 - Dimensões do corpo de prova tubular**

<b>Corpo de prova tubular</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Dimensão (mm)</b>
$d_G$	12
$t$	0.8
$d_o$	10
$d_i$	8.4
$R$	32
$L$	85
$L_G$	20
$L_{GT}$	35
$L_S$	15
$L_g$	9
$\frac{d_o}{t}$	12.5

O desenho técnico foi feito com as dimensões do corpo de prova determinadas. A Figura 6 mostra o desenho do corpo de prova.

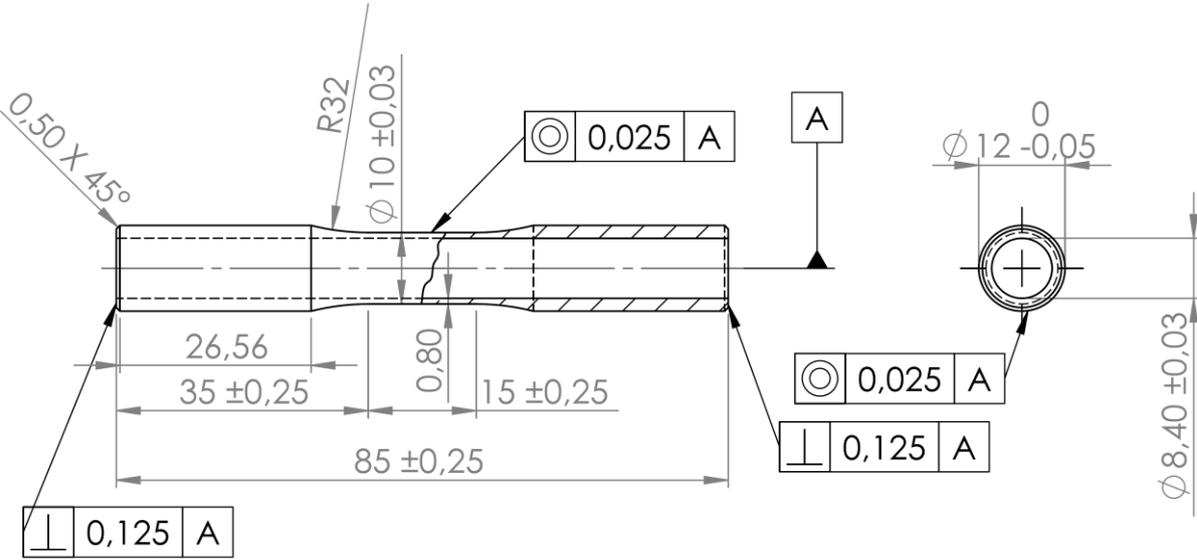


Figura 6 - Desenho do corpo de prova

### 4.2.3 ESPESSURA DA PAREDE

A espessura da parede é um ponto crítico no projeto do corpo de prova tubular de parede fina. A parede tem de ser fina o suficiente para se utilizar o critério de parede fina, que, segundo a norma ASTM E2207, a relação entre o diâmetro externo da seção útil e a espessura da parede tem de ser no mínimo de 10:1, porém tem de ser espessa o suficiente, a fim de evitar instabilidades como flambagem por torção e compressão.

Foram feitos cálculos da diferença da distribuição linear e da distribuição constante da tensão cisalhante no corpo de prova tubular na parede com o intuito de verificar o erro associado à utilização do critério de parede fina, considerando um momento torçor de  $M_t = 50 \text{ Nm}$ , raio externo da seção útil de  $r_o = 5 \text{ mm}$  e espessura da parede de  $t = 0,8 \text{ mm}$ . As situações são apresentadas abaixo.

- Caso 1 - distribuição linear (Fig. 7)

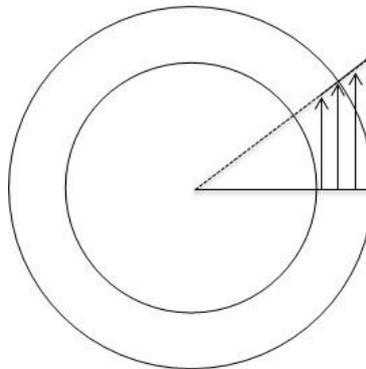


Figura 7 - Distribuição linear na parede do corpo de prova tubular (seção transversal)

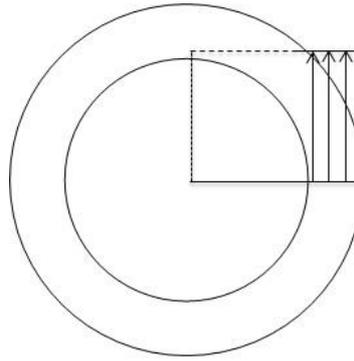
$$J = \frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{2} \cong 492,96 \text{ mm}^4 \quad (14)$$

$$\tau = \frac{M_t \cdot r}{J} \cong 101,428 \cdot r \frac{\text{MPa}}{\text{mm}} \quad (15)$$

$$\tau_{\max} \cong 507,14 \text{ Mpa} \quad (16)$$

Onde  $J$  é o segundo momento polar de área,  $r_i$  é o raio interno da seção útil do corpo de prova e  $\tau$  é a tensão cisalhante devido ao momento torçor.

- Caso 2 - distribuição constante (Fig. 8)



**Figura 8 - Distribuição constante na parede do corpo de prova tubular (seção transversal)**

$$M_t = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \tau r^2 dr = \frac{2\pi\tau}{3} (r_o^3 - r_i^3) \quad (17)$$

$$\tau = \frac{3M_t}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \cong 468,97 \text{ MPa} \quad (18)$$

A diferença das tensões máximas de cisalhamento no raio externo do corpo de prova determinadas, em ambos os casos, revela um erro de aproximadamente 8%. Cabe salientar que, para valores menores de espessura da parede, o erro associado tende a ser menor por causa do gradiente tensão-deformação.

Bonacuse e Kalluri (1993) concluíram que houve pouco ou nenhum efeito no comportamento da deformação ou na vida em fadiga do material, com o intuito de verificar a influência da espessura dos corpos de prova nos valores de 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm em testes de fadiga multiaxial.



desenvolvida industrialmente, possui máquinas menos precisas na fabricação de peças, se comparadas às máquinas disponíveis nos maiores polos industriais do país. O material dos corpos de prova é aço SAE 1020. O acabamento de um dos corpos de prova é polimento, somente na área de seção útil, enquanto no outro corpo de prova não foi feito nenhum acabamento, é apenas usinado. A Figura 10 é a foto do corpo de prova de seção cheia fabricado com acabamento polido. A Figura 11 é a foto do corpo de prova fabricado com acabamento resultante da fase de usinagem.



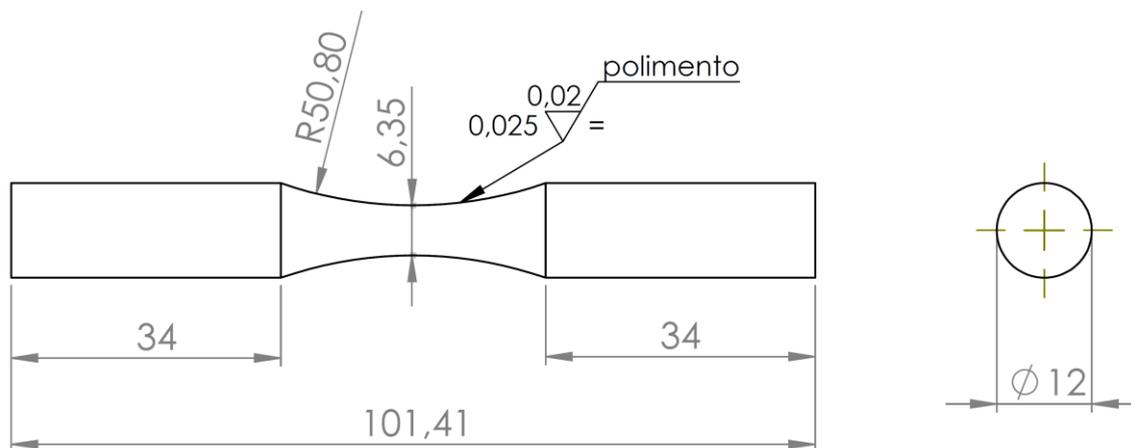
**Figura 10 - Foto do corpo de prova de seção cheia polido**



**Figura 11 - Foto do corpo de prova de seção cheia apenas usinado**

Alguns defeitos de fabricação foram notados visualmente, como certos entalhes no raio de circunferência na área de transição do corpo de prova. Esses defeitos se devem ao fato de ter sido utilizado, na fabricação, torno convencional com ferramenta para fabricar o raio de circunferência, e não ter sido utilizado um torno CNC. Consequentemente, o raio de circunferência não foi realizado com homogeneidade, e o mesmo não ficou constante ao longo da área de transição, provocando ranhuras que possivelmente acarretaram em concentradores de tensão nessas áreas.

O segundo projeto de corpo de prova foi elaborado com a intenção de facilitar ainda mais o processo de fabricação destes e evitar falhas que possam provocar concentrações de tensão. Além da vantagem de fabricação, o projeto de seção útil de 6,35 mm possui a vantagem de se aplicar menores valores de força e torque para que a tensão desejada seja obtida, evitando problemas de deslizamento do corpo de prova. Porém, valores de diâmetro útil menores proporcionam gradientes de tensão cisalhante elevados. A Figura 12 mostra o desenho do novo projeto. Pode-se verificar que existe apenas um raio de transição.



**Figura 12 - Desenho do corpo de prova de seção cheia e raio único de transição**

Os corpos de prova referentes ao projeto da Figura 12 foram fabricados em torno CNC, diminuindo a probabilidade de falhas na execução do raio de transição. Foi encomendada a fabricação de doze unidades, todas em aço SAE 1045, sendo que seis com acabamento polido e as outras seis com acabamento usinado. Foram fabricados corpos de prova com dois tipos de acabamento para se estudar o efeito da rugosidade superficial na vida em fadiga dos espécimes. A foto da Figura 13 mostra os seis corpos de prova com acabamento polido, e a Figura 14 mostra a foto dos seis corpos de prova com acabamento usinado.



**Figura 13 - Corpos de prova de seção cheia de diâmetro útil 6,35mm – polidos**



**Figura 14 - Corpos de prova de seção cheia de diâmetro útil 6,35mm – usados**

O processo de polimento foi feito em três etapas. A primeira etapa foi realizada com a passagem de lixa de granulação 80. A segunda, com lixa de granulação 220 e a última etapa com uma lixa de granulação 1200, dando acabamento espelhado ao corpo de prova.

# 5 FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA

## 5.1 FABRICAÇÃO

A fabricação do corpo de prova tubular de parede fina impõe várias dificuldades. Existe a necessidade de precisão nas máquinas e na execução das etapas de fabricação para que o espécime esteja nas condições especificadas e atenda aos objetivos nos ensaios de fadiga. Muitas dessas dificuldades residem no fato desse corpo de prova ter de atender requisitos de concentricidade no processo de furação, e requisitos de acabamento interno do furo. Por apresentar parede fina, cuidados devem ser tomados para evitar alterações nas propriedades mecânicas do material nos processos de fabricação.

Foram feitas algumas tentativas de fabricação dos corpos de prova com a colaboração do MEng. Hélio Queiroz e a equipe de Professores da área mecânica da Faculdade de Tecnologia SENAI de Anápolis – GO, com o objetivo de ao longo desse processo, seja possível adquirir conhecimento para desenvolver as etapas e processos de fabricação que resultem em um corpo de prova o mais próximo possível das especificações que a norma estabelece.

Dois tipos de corpos de prova tubulares foram fabricados. Os desenhos técnicos com as dimensões de ambos estão nos anexos deste trabalho. Os corpos de prova foram feitos de aço SAE 1045. A máquina utilizada na usinagem externa dos corpos de prova é um torno CNC Diplomat/Nardini modelo LOGIC 195VS, mostrado na Fig. 15. O torno utilizado na furação dos corpos de prova é um ROMI modelo TORMAX 20, similar ao mostrado na Fig.16.



Figura 15 - Torno CNC utilizado na fabricação dos corpos de prova tubulares



Figura 16 - Torno convencional ROMI modelo TORMAX 20

O processo de fabricação pode apresentar mudanças para se adequar ao comportamento do material perante a usinagem, portanto são apresentadas a seguir as etapas de fabricação de modo a descrever o processo que foi utilizado para a fabricação do corpo de prova de 23.7 mm, cujas dimensões são mostradas na Fig. 17:

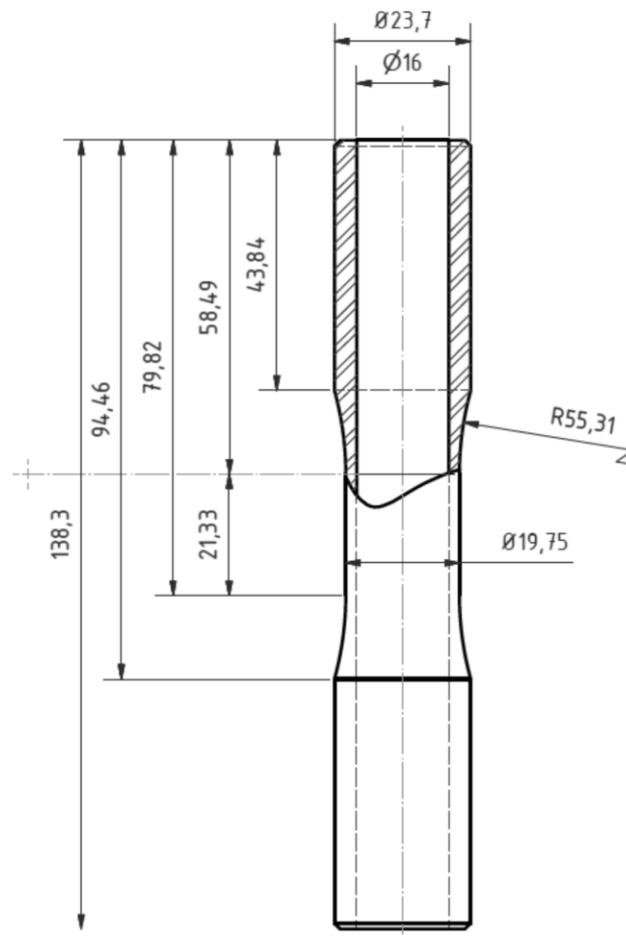


Figura 17 - Dimensões do corpo de prova tubular fabricado

- Primeiramente, a barra cilíndrica de 25.4 mm de diâmetro é cortada;
- Depois, é realizado o faceamento das pontas do espécime, deixando-o na medida do comprimento, que é 138.3 mm;
- Posteriormente, o corpo de prova é furado com uma broca com diâmetro de 15,5 mm, com rotação da máquina de aproximadamente 600 RPM;
- Após o processo de furação, é feita a passagem do alargador helicoidal DIN-212d (mostrado na Fig. 18), de diâmetro de 16 mm e classe de tolerância H7, a uma velocidade de rotação de 80 RPM. A passagem do alargador deixa o interior do furo pronto para o processo de acabamento interno com a finalidade de atingir a rugosidade especificada. É importante garantir que o sobremetal deixado após a etapa de furação seja de aproximadamente de 0.2 a 0.4 mm, para que não sobrecarregue o alargador e o furo fique com o acabamento e tolerância desejados para a realização do brunimento;



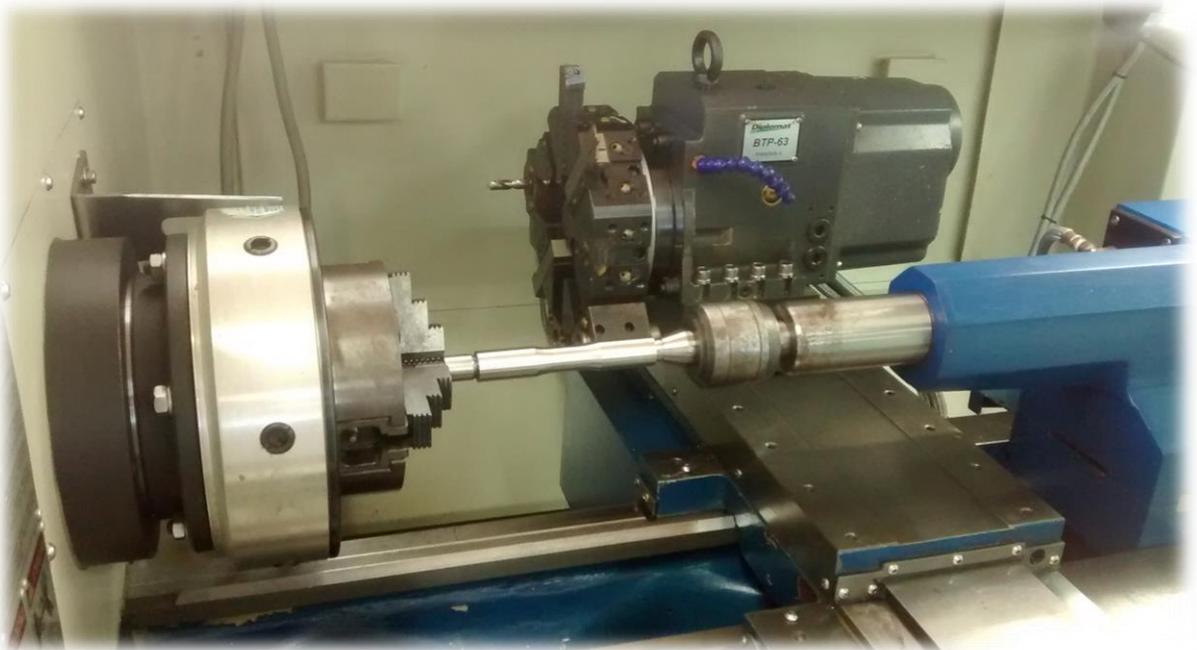
**Figura 18 - Alargador helicoidal DIN-212d utilizado na fabricação**

- A etapa seguinte consiste em fixar a peça no torno pelo furo recém-feito. A peça é fixada, por pressão, entre pontos cônicos. Dessa forma, a concentricidade entre a superfície externa e interna é atingida mais facilmente. A Figura 19 ilustra como é feita essa fixação.



**Figura 19 - Fixação para torneamento externo**

- Após a fixação, programa-se o torno CNC para desbaste (G71), e insere-se as coordenadas para que o torno usine a parte externa do corpo de prova. O processo é realizado em rotações de aproximadamente de 1000 a 1600 RPM, e avanço de 0.1 mm. A Figura 20 mostra o corpo de prova após esta etapa, e a Figura 21 mostra um exemplo do programa usado na confecção da peça.



**Figura 20 - Corpo de prova tubular após usinagem no torno CNC**

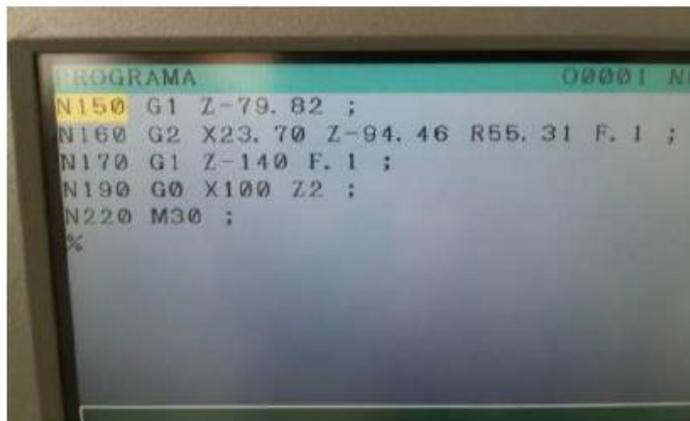
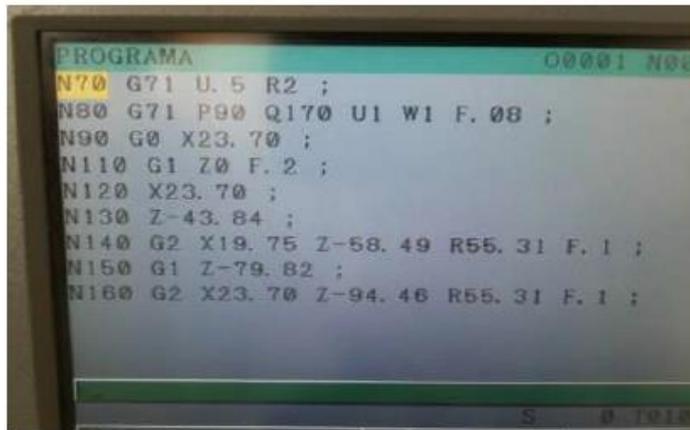
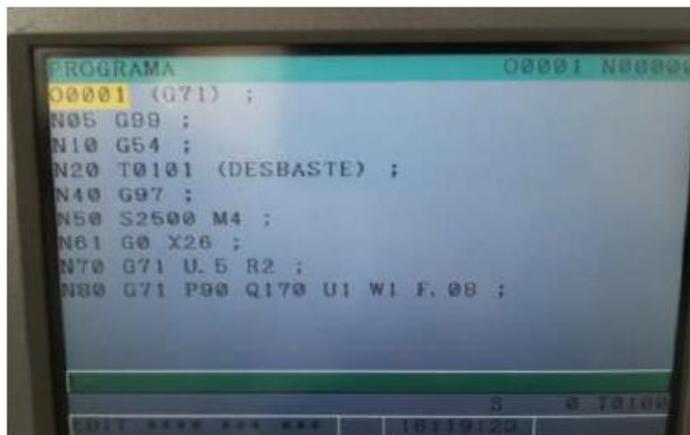


Figura 21 - Programa utilizado no torno CNC

- O furo interno passa por brunimento com ferramentas similares às apresentadas na Fig. 22. Uma das fabricantes da ferramenta, a Osborn, recomenda que o processo seja feito a velocidades entre 350 a 700 RPM, durante 20 a 40 segundos, com a lubrificação com óleo de viscosidade SAE 10 a 30 ou óleo específico para o brunimento. A ferramenta é aplicável a máquinas rotativas portáteis ou automáticas e disponível para vários diâmetros e para vários tamanhos de grãos abrasivos. A Figura 23 mostra outra opção à solução anterior, adaptando réguas diamantadas a alargadores expansivos;



**Figura 22 - Ferramenta de brunimento - *Flex Honing***



**Figura 23 - Réguas diamantadas em alargadores expansivos**

- A parte externa é polida em etapas, diminuindo a granulação do abrasivo. O polimento é finalizado polindo a superfície com pasta abrasiva, dando acabamento espelhado à peça.

É importante garantir que os parâmetros de usinagem sejam bem escolhidos para evitar possíveis problemas, como vibração, resultando na precisão e acabamento esperados após as etapas do processo de usinagem. As máquinas utilizadas na fabricação devem estar em perfeitas condições de alinhamento e ajustes para que possa conferir paralelismo e outros requisitos básicos de usinagem.

O processo pode ser adaptado para a fabricação de corpos de prova para diferentes dimensões. Fotos dos corpos de prova de diâmetro de 23.7 mm são mostrados nas Figs. 24 a 27.



Figura 24 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (1)



Figura 25 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (2)



Figura 26 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (3)



Figura 27 - Corpo de prova tubular com diâmetro de garra de 23.7 mm. (4)

Analisando os corpos de prova fabricados, o furo interno não alcançou o nível de acabamento esperado depois da usinagem. Este resultado é consequência do fato de o alargador ter ficado sobrecarregado com a retirada do material sobressalente. O material a ser retirado pela passagem do alargador foi maior do que o recomendado, pela indisponibilidade da broca de 15,5 mm de diâmetro, a qual seria a ideal para o processo de furação. O furo ficou com o diâmetro de 15,3 mm antes da passagem do alargador, sobrecarregando-o, prejudicando o acabamento.

Fotos do corpo de prova com diâmetro de garra de 12 mm, o qual foi feito a partir de barra cilíndrica de 12,7 mm de diâmetro, são apresentados na Fig. 28.



Figura 28 - Corpo de prova tubular usinado

## 5.2 QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA

A qualificação metrológica tem como objetivo verificar se o corpo de prova atendeu às especificações quanto a tolerâncias geométricas, tolerâncias dimensionais e rugosidade superficial. As tolerâncias dimensionais são importantes quando existe a necessidade de fabricação de lotes de corpos de prova quase idênticos para não comprometer os resultados dos ensaios à fadiga. As tolerâncias dimensionais se tornam menores à medida em que a necessidade de semelhança entre os corpos de prova aumenta.

As tolerâncias geométricas são também de grande importância, a fim de evitar que o espécime seja irregular e distribua as tensões erroneamente, garantindo, por exemplo, que a parede fina do corpo de prova tubular esteja com espessura constante, para que as tensões se distribuam uniformemente ao longo da seção circular.

Os corpos de prova tubulares de parede fina têm tolerâncias pequenas devido a uma série de fatores, como a natureza dos esforços que exigem um acabamento fino da superfície, a sensibilidade a variações dimensionais nos ensaios de fadiga e a dimensão reduzida da parede fina, que exige precisão na fabricação.

A parte de verificação da tolerância geométrica de concentricidade entre as superfícies externas e internas, da tolerância dimensional, e da tolerância geométrica de perpendicularidade pode ser feita em Máquina de Medir por Coordenadas (MMC).

A concentricidade é verificada fazendo a medição da superfície interna e, posteriormente, a medição da superfície externa, e então o programa no computador da máquina já prediz o quanto as superfícies são concêntricas.

A medição das rugosidades médias aritméticas (Ra) da superfície dos corpos de prova de seção cheia foi realizada pelo rugosímetro digital da marca MITUTOYO modelo SJ-201 do laboratório de metrologia da Universidade de Brasília, mostrado na Figura 29. A medição é realizada através de uma haste que possui uma agulha na extremidade. Essa agulha entra em contato com os picos e vales da superfície da peça a ser medida, enquanto a haste percorre a extensão da peça e o valor da rugosidade média é calculada.

As Tabelas 5 e 6 possuem as medições de rugosidade dos corpos de prova (seção cheia) de 10 mm de diâmetro de seção útil (Figura 9). A Tabela 5 refere-se ao corpo de prova usinado e a Tabela 6 ao corpo de prova polido.

**Tabela 5 - Rugosidade superficial do corpo de prova seção cheia 10mm - usinado**

<b>Rugosidade superficial do corpo de prova usinado</b>	
<b>Medição</b>	<b>Rugosidade superficial (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>1</b>	1,51
<b>2</b>	1,53
<b>3</b>	1,46
<b>4</b>	1,52
<b>5</b>	1,31

**Tabela 6 - Rugosidade superficial do corpo de prova seção cheia 10 mm - polido**

<b>Rugosidade superficial do corpo de prova polido</b>	
<b>Medição</b>	<b>Rugosidade superficial (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>1</b>	0,12
<b>2</b>	0,11
<b>3</b>	0,09
<b>4</b>	0,13
<b>5</b>	0,10
<b>6</b>	0,10
<b>7</b>	0,10
<b>8</b>	0,11
<b>9</b>	0,08
<b>10</b>	0,10



**Figura 29 - Equipamento utilizado para medição de rugosidade – Rugosímetro digital MITUTOYO – SJ201**

Os corpos de prova de seção cheia e diâmetro útil de 6,35mm também foram verificados quanto ao dimensionamento e ao acabamento. As rugosidades superficiais são relacionadas nas Tabelas 7 e 8. A diferença entre a rugosidade superficial entre o corpo de prova de diâmetro útil de 10 mm para o corpo de prova de diâmetro útil de 6,35 mm pode estar relacionada à diferença de material dos corpos de prova. O aço 1020 por ser um aço com ductilidade maior, a rugosidade superficial resultante, tanto do processo de acabamento quanto da usinagem, é menor.

**Tabela 7 - Rugosidade superficial do corpo de prova de seção cheia 6,35mm - usinado**

<b>Rugosidade superficial do corpo de prova usinado</b>	
<b>Medição</b>	<b>Rugosidade superficial (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>1</b>	2,80
<b>2</b>	3,73
<b>3</b>	3,79
<b>4</b>	2,90
<b>5</b>	4,17

**Tabela 8 - Rugosidade superficial do corpo de prova de seção cheia 6,35mm - polido**

<b>Rugosidade superficial do corpo de prova polido</b>	
<b>Medição</b>	<b>Rugosidade superficial (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>1</b>	0,61
<b>2</b>	0,57
<b>3</b>	0,40
<b>4</b>	0,45
<b>5</b>	0,50

As dimensões medidas dos corpos de prova estão contidas na Tabela 9.

Tabela 9 - Medições dos corpos de prova de seção cheia 6,35mm

<b>Dimensões dos corpos de prova seção cheia 6,35mm</b>		
<b>Dimensão [mm]</b>	<b>Usinado</b>	<b>Polido</b>
<b>Raio</b>	49,25	48,52
<b>Comprimento</b>	101,65	101,53
<b>Diâmetro da garra</b>	11,97	11,96
<b>Diâmetro da seção útil</b>	6,30	6,20

Os raios dos arcos de circunferência dos corpos de prova foram medidos utilizando a máquina: projetor de perfil modelo PJ-A3000 – MITUTOYO, mostrada na Figura 30. É feita a projeção com aumento de 10x do perfil do corpo de prova, e o usuário marca três pontos para que a máquina calcule o raio do arco de circunferência.



Figura 30 – Máquina projetor de perfil utilizada para a medição dos arcos de circunferência

Apesar dos corpos de prova de seção cheia com diâmetro de seção útil de 6,35 mm terem ficado fora de algumas tolerâncias dimensionais e de acabamento definidas em projeto, um fator importante, é que a variação entre os corpos de prova de um mesmo lote, foi relativamente pequena.

A variação entre os corpos de prova pode ser verificada nos valores de diâmetro de seção útil, que é um parâmetro essencial a ser considerado nos ensaios, listados nas Tabelas 10 e 11. Analisando os resultados pode-se perceber que a variação máxima é de 0,03mm nos corpos de prova que foram somente usinados, e uma variação máxima de 0,05mm nos corpos de prova que foram polidos. A diferença de diâmetro entre os corpos de prova que foram polidos e os que foram apenas usinados se

deve ao material desbastado no processo de polimento. Os corpos de prova que iam passar pelo polimento deveriam ser usinados com sobremetal a ser desbastado no processo.

Como o processo de polimento aplicado aos corpos de prova foi manual, a maior variação dos diâmetros de seção útil dos espécimes que foram polidos pode ser justificada pela dificuldade de se manter uma regularidade de material desbastado neste processo.

**Tabela 10 - Diâmetro da seção útil dos corpos de prova usinados**

<b>Diâmetro da seção útil dos corpos de prova usinados</b>	
<b>Corpo de prova</b>	<b>Diâmetro [mm]</b>
1	6,30
2	6,32
3	6,31
4	6,29
5	6,31
6	6,32

**Tabela 11 - Diâmetro da seção útil dos corpos de prova polidos**

<b>Diâmetro da seção útil dos corpos de prova polidos</b>	
<b>Corpo de prova</b>	<b>Diâmetro [mm]</b>
1	6,20
2	6,22
3	6,19
4	6,23
5	6,24
6	6,19

# 6 ENSAIOS MECÂNICOS

## 6.1 ENSAIOS

Ensaio mecânico de fadiga foram realizados com o intuito de se verificar se os corpos de prova fabricados se comportam como o esperado, ou seja, não ocorra nenhum problema relacionado a escorregamento, deformação indesejada, ou quebra em local inesperado dos corpos de prova, e também para verificar a influência do acabamento do espécime na vida à fadiga do mesmo. Os corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios de fadiga são os espécimes de seção cheia. A decisão de se utilizar os projetos de seção cheia foi tomada levando em consideração as dificuldades relacionadas à precisão exigida na fabricação dos corpos de prova tubulares de parede fina, e em problemas em ensaios iniciais quanto a quebra em lugares inesperados, escorregamento e deformação da área da garra. Dessa forma, o corpo de prova de seção cheia se enquadra melhor nos recursos disponíveis para a fabricação e diminui a probabilidade de ocorrência desses problemas.

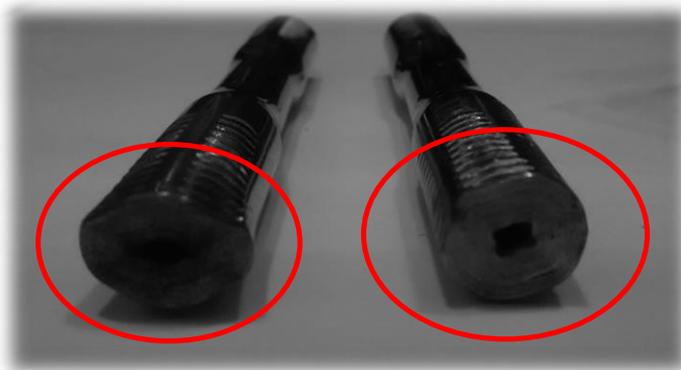
O projeto inicial era o estudo de ensaios controlados por deformação fora de fase, não proporcionais, na área de deformação plástica com a utilização de corpos de prova tubulares de parede fina. A escolha pela utilização dos corpos de prova de seção cheia, a limitação do software utilizados nos testes (MTS Station Manager Basic Testware), o qual não suporta testes fora de fase, e a falta de treinamento para a realização de tais ensaios, incentivou a mudança de foco para ensaios na região elástica do material.

Além da dificuldade na fabricação dos corpos de prova tubulares de parede fina, houve complicações nos testes realizados com tais corpos de prova, como o amassamento das extremidades do corpo de prova tubular e flambagem. Uma das formas possíveis de evitar o problema de amassamento das extremidades do corpo de prova é utilizar um mandril no furo do corpo de prova, nas extremidades do mesmo na área em que a pressão da garra é exercida, afim de que não ocorram tais deformações indesejáveis.

Alguns dos corpos de prova fabricados na Faculdade de Tecnologia do SENAI de Anápolis – GO foram ensaiados, revelando os problemas técnicos citados. Algumas fotos pós-testes (Figuras 31 a 33) demonstram a flambagem da seção útil no corpo de prova tubular, as deformações na área de garra, e também quebras em locais inesperados, possivelmente causados por defeitos no processo de fabricação, na realização da curvatura do raio de transição, que introduziram concentradores de tensões nos corpos de prova. Esses ensaios iniciais serviram de aprendizado no sentido de ajustar a regulagem da pressão das garras e de se evitar no processo de fabricação qualquer falha que possa introduzir concentração de tensão nos corpos de prova.



**Figura 31 - Corpo de prova tubular com problema de flambagem**



**Figura 32 - Corpo de prova com defeito de amassamento nas garras**



**Figura 33 - Corpo de prova com quebra em na área da garra**

Os ensaios que serão realizados nos corpos de prova de seção cheia serão de fadiga de alta ciclagem (High Cycle Fatigue – HCF). Este tipo de ensaio é realizado utilizando tensões abaixo do limite de escoamento do material, ou seja, o material permanece no comportamento linear elástico. Os ensaios também são controlados por tensão, diferentemente dos ensaios para os corpos de prova tubulares em que os ensaios são de baixa ciclagem (Low Cycle Fatigue – LCF), e controlados por deformação.

Primeiramente foi realizado o ensaio de tração monotônico, com o intuito de determinar o limite de escoamento do material.

Para os ensaios de fadiga de alta ciclagem, os valores de tensões utilizados foram determinados levando em consideração a tensão equivalente obtida pela teoria da energia de distorção máxima (Teoria de von Mises). A fórmula da tensão equivalente para estado plano de tensões é apresentada abaixo.

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Considerando um estado plano de tensões em que estejam atuantes tensão normal na direção x e tensão de cisalhamento, conforme a Figura 34, nesse caso a equação (20) se resume a:

$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

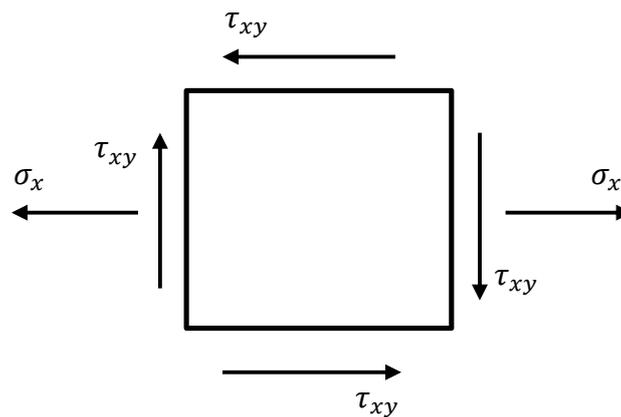


Figura 34 - Estado plano de tensões

Considerando o caso de cisalhamento puro a relação entre a tensão equivalente e a tensão de cisalhamento é dada pela equação (21).

$$\sigma' = \sqrt{3\tau_{xy}} \quad (21)$$

Definindo o parâmetro lambda como sendo.

$$\lambda = \frac{\tau_a}{\sigma_a} \quad (22)$$

Limitando a tensão equivalente de von Mises para ser aproximadamente 80% do limite do escoamento do material, e variando o valor de lambda, os valores da tensão normal e cisalhante a serem

usados nos ensaios de fadiga de alta ciclagem são relacionados na Tabela 12. Os valores de amplitude de força e torque foram obtidos levando em consideração o projeto do corpo de prova de seção cheia e único raio. O valor do raio na seção útil é de 6,35 mm.

$$\sigma' = 0,8S_y \quad (23)$$

**Tabela 12 - Amplitude de tensões para os ensaios mecânicos**

**Amplitude de Tensões normais e cisalhantes ( $\sigma' = 640 \text{ MPa}$ ).**

$\lambda$	$\sigma_a$ (MPa)	$\tau_a$ (MPa)	$F_a$ (N)	$T_a$ (N.m)
<b>0</b>	640	0	19200	0
<b>1</b>	320	320	9700	15

Foram realizados testes para os valores de lambda ( $\lambda$ ) relacionados na Tabela 6 com corpos de prova com o acabamento polido e com acabamento usinado. Os valores de força e torque aplicados para os corpos de prova com acabamento usinado foram adequados à diferença do diâmetro da seção útil.

O software utilizado no computador conectado à máquina é o MTS Station Manager Basic Testware.

## 6.2 RESULTADOS

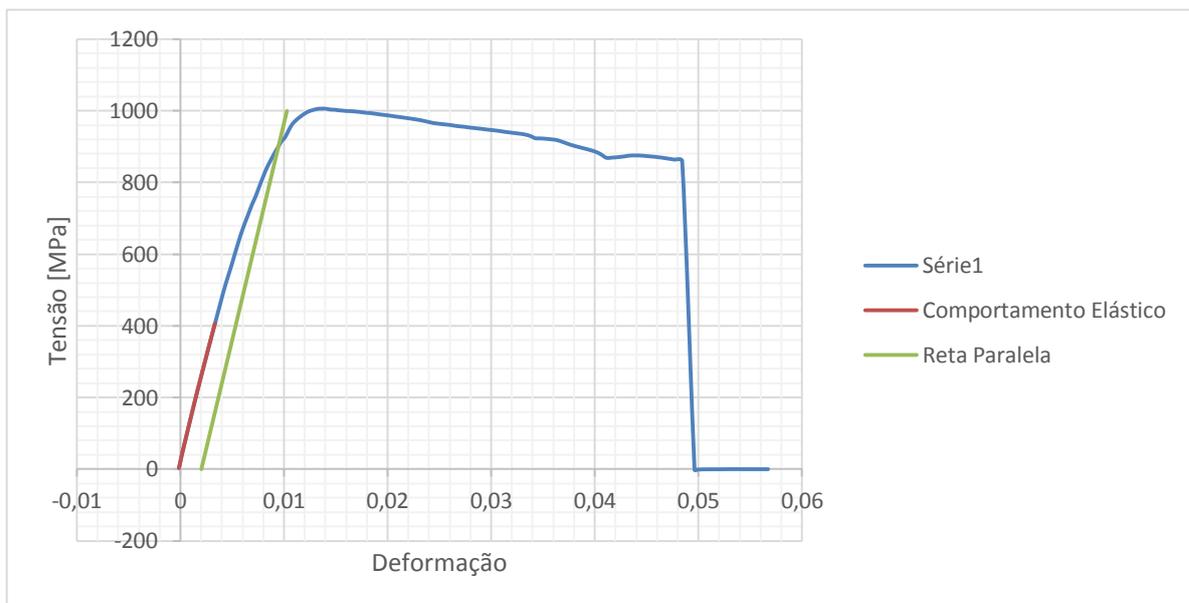
Os ensaios realizados com a máquina multiaxial axial/torcional foram satisfatórios. Não aconteceram problemas como escorregamento, amassamento ou quebras em lugares indesejáveis do corpo de prova. O projeto do corpo de prova de seção cheia e raio útil de 6,35 mm cumpriu as expectativas. Os resultados obtidos em cada ensaio são apresentados a seguir.

### 6.2.1 ENSAIOS MONOTÔNICOS

Foram realizados dois ensaios monotônicos de tração. O gráfico do primeiro ensaio monotônico de tração é representado na Figura 35. A reta foi confeccionada levando em consideração uma deformação de 0,2% ( $\epsilon=0,002$ ) do corpo de prova, e traçada paralelamente ao comportamento elástico do material. Semelhantemente, a curva tensão-deformação do segundo ensaio monotônico foi realizada e é demonstrada na Figura 36. Pela análise dos gráficos foi obtido o valor de limite de escoamento, fazendo média aritmética entre os dois ensaios, de aproximadamente  $S_y=800\text{MPa}$ . Esse valor é relativamente alto para a expectativa de limite de escoamento para o material encomendado, o aço SAE 1045 laminado a quente, o que indica um aço com maior teor de carbono, ou um aço SAE 1045 tratado termicamente. As fotos dos corpos de prova após as fraturas dos ensaios monotônicos são mostradas nas Figs. 37 e 38.



**Figura 35 - Gráfico Tensão x Deformação - Primeiro ensaio monotônico de tração**



**Figura 36 - Gráfico Tensão x Deformação - Segundo ensaio monotônico de tração**



**Figura 37 - Foto do corpo de prova fraturado – Primeiro ensaio monotônico de tração**



**Figura 38 - Foto do corpo de fraturado - Segundo ensaio monotônico de tração**

### **6.2.2 ENSAIO DE DUREZA**

O material encomendado para os corpos de prova foi o aço SAE 1045 laminado à quente. Após alguns ensaios, notou-se a maior resistência e dureza do material do que o esperado para um aço SAE 1045 laminado à quente, o que incentivou a realização de um ensaio de dureza, para confirmar a suspeita de um material mais resistente e mais duro do que o encomendado.

O tipo de ensaio escolhido foi o ensaio Brinell. O ensaio de dureza Brinell é realizado através da aplicação de uma força compressiva (Q) por um tempo determinado (t), no material por uma ferramenta esférica de diâmetro (D). A força aplicada provocará uma impressão permanente no material no formato de uma calota esférica com extensão (d) (Souza, 1982). O valor de dureza  $H_B$  é obtido pela divisão da carga aplicada pela área da superfície esférica da indentação, conforme demonstrado na equação (24).

$$HB = \frac{2Q}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (24)$$

O valor utilizado de diâmetro de esfera foi de 2,5 mm e de força foi de 187,5 kgf. A dureza Brinell obtida foi de  $H_B=255,4$ . Esse valor para a dureza confirmou que o material era muito mais duro do que a expectativa de um aço SAE 1045 laminado a quente. A máquina utilizada no ensaio é a ZWICK/ROELL modelo ZHU 250 para ensaios de dureza universais, e é mostrada na foto da Figura 39.



Figura 39 - Foto da máquina de ensaio de dureza Brinell - ZWICK/ROELL - ZHU 250

### 6.2.3 ENSAIOS CÍCLICOS

Os resultados dos ensaios de fadiga axiais, contendo o número de ciclos até a falha ( $N_f$ ), a tensão utilizada e o acabamento do corpo de prova, estão apresentados na Tabela 13, a qual também contém os valores de frequência utilizado em cada ensaio.

Tabela 13 - Amplitude de Tensões normais e cisalhantes - Ensaios cíclicos axiais

**Amplitude de Tensões normais e cisalhantes - Ensaios de fadiga axial**

$\sigma'$	$\sigma_a$ (MPa)	$\tau_a$ (MPa)	$F_a$ (N)	$T_a$ (N.m)	Acabamento	Frequência (Hz)	$N_f$
<b>640</b>	640	0	19400	0	Polido	3	1268
<b>640</b>	640	0	19900	0	Usinado	3	770
<b>560</b>	560	0	17500	0	Usinado	3	3386
<b>448</b>	448	0	13500	0	Polido	5	81309

As Figuras 40 a 43 contêm as fotos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga axial após as quebras.



Figura 40 - Foto do corpo de prova fraturado (polido) – Primeiro ensaio de fadiga axial



**Figura 41 - Foto do corpo de prova fraturado (usinado) – Segundo ensaio de fadiga axial**



**Figura 42 - Foto do corpo de prova fraturado (usinado) – Terceiro ensaio de fadiga axial**



**Figura 43- Foto do corpo de prova fraturado (polido) – Quarto ensaio de fadiga axial**

Os ensaios multiaxiais realizados foram em fase e totalmente alternados. As escolhas das tensões normais e cisalhantes a serem utilizadas foram feitas a partir da tensão equivalente de von Mises para valor de  $\lambda = 1$ . Foram realizados dois ensaios multiaxiais, e as informações de cada ensaio podem ser verificadas na Tabela 14.

**Tabela 14 - Amplitude de Tensões normais e cisalhantes - Ensaio cíclicos multiaxiais**

**Amplitude de Tensões normais e cisalhantes - Ensaio de fadiga multiaxial**

$\sigma'$	$\sigma_a$ (MPa)	$\tau_a$ (MPa)	$F_a$ (N)	$T_a$ (N.m)	Acabamento	Frequência (Hz)	$N_f$
<b>640</b>	320	320	9700	15	Polido	3	9556
<b>640</b>	320	320	10000	15,7	Usinado	3	9081

Pode-se extrair dos dados obtidos, tanto dos ensaios de fadiga axiais, quanto dos ensaios de fadiga multiaxiais, que existe a tendência de que os corpos de prova polidos possuam valores maiores de número de ciclos até a falha. Este era comportamento esperado, de que o acabamento influencia diretamente a vida em fadiga do material, levando em consideração que qual imperfeição na superfície

do corpo de prova pode levar à iniciação de trincas. A figura 44 é a foto do corpo de prova polido fraturado, e a Figura 45 a foto do corpo de prova usinado fraturado após os ensaios de fadiga multiaxiais.



**Figura 44 - Foto do corpo de prova fraturado (polido) – Ensaio de fadiga multiaxial**



**Figura 45 - Foto do corpo de prova fraturado (usinado) – Ensaio de fadiga multiaxial**

# 7 CONCLUSÃO

## 7.1 CONCLUSÃO

A mudança de prioridade para os corpos de prova de seção cheia e ensaios de fadiga de alta ciclagem se fez necessária, por causa das dificuldades encontradas, tanto na precisão exigida na fabricação do corpo de prova tubular, como os problemas encontrados: de escorregamento, de amassamento da área de garra e de flambagem nos ensaios iniciais com os corpos de prova. No contexto desse projeto de graduação, não haveria tempo hábil, sequer recursos disponíveis para a solução desses problemas.

As modificações propostas ao longo da realização deste estudo, das características do corpo de prova, tiveram por objetivo eliminar os problemas iniciais encontrados nos ensaios. Diminuição do diâmetro da seção útil, aumento no comprimento da área de garra, e não polir a mesma, foram medidas tomadas a fim de que não houvesse deslizamento do corpo de prova na garra. A opção de único raio teve como objetivo facilitar o processo de fabricação e evitar quebras em locais indesejáveis. Tais modificações lograram êxito, ratificadas pelos resultados dos ensaios em que os corpos de prova se comportaram como o esperado em relação a esses problemas citados. Apesar de o material do corpo de prova ser mais resistente do que o aço SAE 1045 laminado à quente, necessitando de valores de força e torque maiores para a obtenção da tensão desejada, não houve problemas quanto ao escorregamento e amassamento do corpo de prova na série de ensaios monotônicos e cíclicos realizados.

A qualificação metrológica demonstrou que os corpos de prova fabricados estavam fora de algumas das especificações de projeto em relação a tolerâncias dimensionais. Porém um fator importante a ser considerado é que a fabricação conseguiu garantir certa repetitividade de dimensões entre corpos de prova de um mesmo lote, não influenciando negativamente os resultados dos ensaios.

Pode-se concluir dos resultados dos ensaios cíclicos, que a melhora no acabamento do corpo de prova proporciona aumento na vida em fadiga do mesmo. O melhor acabamento do corpo de prova evita que haja iniciação de trincas na superfície do material.

## 7.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros que venham dar continuidade a este projeto devem ter como objetivo aprofundar os estudos acerca dos corpos de prova tubulares de parede fina. Priorizar soluções para os problemas citados: amassamento da área da garra e flambagem.

Uma das soluções possíveis para o problema de amassamento da área da garra é de se utilizar mandris nos furos, no local onde a garra exerce a pressão de fixação. Escolher o valor ideal de espessura da parede e calcular valores de cargas máximas com o intuito de se evitar a flambagem por compressão e por torção.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

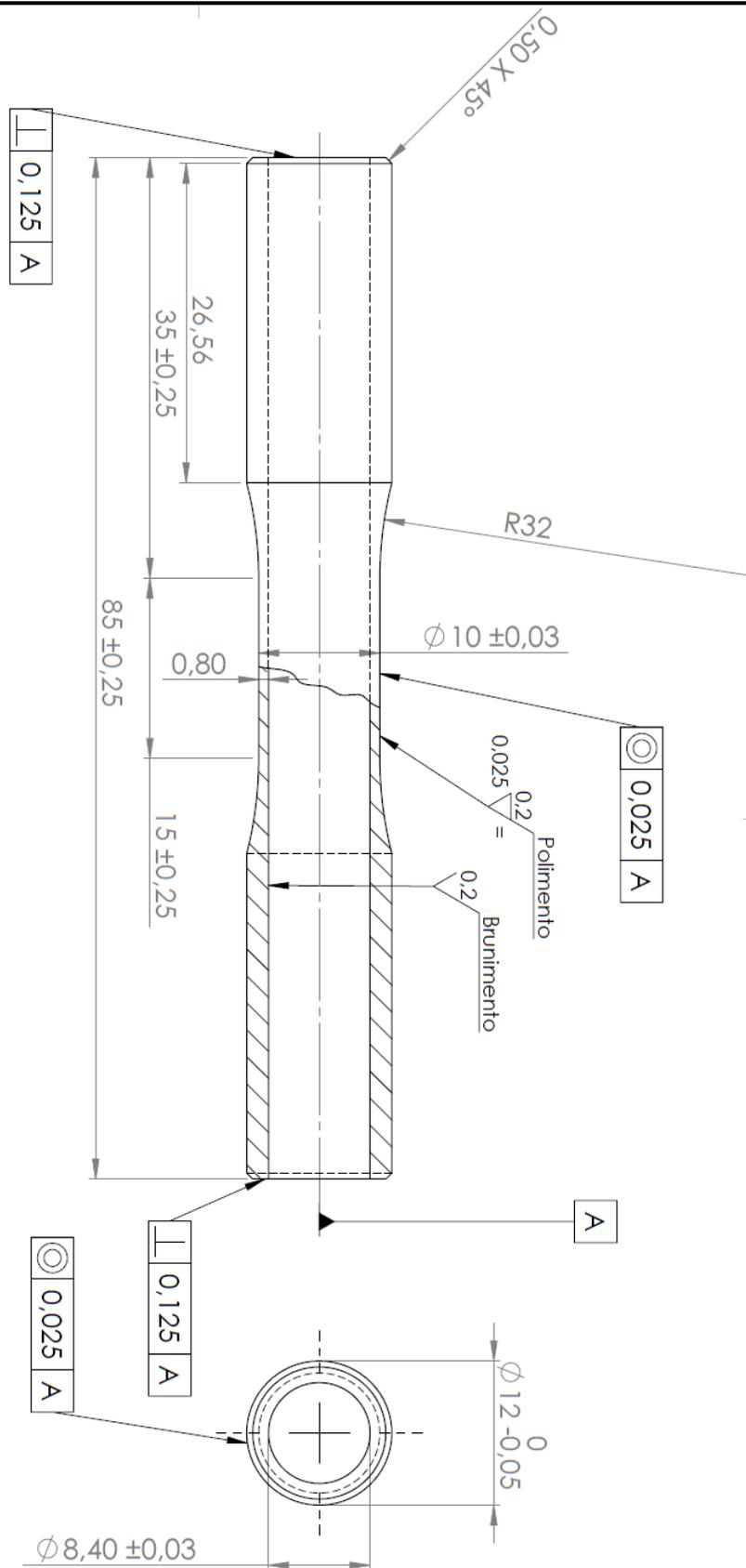
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimens**. E2207-08 (Reapproved 2013)<sup>e1</sup>. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing**. E606/E606M-12. 2012.
- BONACUSE, P. J., KALLURI, S. **Axial-Torsional Fatigue: A study of Tubular Specimen Thickness Effects**. Journal of Testing and Evaluation. JTEVA. Vol. 21. Nº. 3. 1993. pp. 160-167.
- BROWN, M. W., and MILLER, K. J., **A Theory for Fatigue under Multiaxial Stress-Strain Conditions**. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 187., 1973, 745-756.
- DANG-VAN, K., **Macro-Micro Approach in High-Cycle Multiaxial Fatigue** in Advances in Multiaxial Fatigue, ASTM STP 1191, D.L. McDowell and R. Ellis, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, 120-130.
- FATEMI, A. and SOCIE, D. F., **A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading**. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 11, No. 3, 1988, 149-166.
- MAMIYA EN, ARAÚJO JA. **Fatigue limit under multiaxial loadings: on the definition of the equivalent shear stress**. Mech Res Commun 2002; 29:141-151.
- MAMIYA EN, ARAÚJO JA, CASTRO FC. **Prismatic hull: a new measure of shear stress amplitude in multiaxial high cycle fatigue**. Int J Fatigue 2009; 31:1144-53.
- MAMIYA EN, CASTRO FC, ALGARTE RD, ARAÚJO JA, **Multiaxial fatigue life estimation based on a piecewise ruled S-N surface**, Int J Fatigue, 2011; 33:529-540.
- MAMIYA EN, CASTRO FC, MALCHER L, ARAÚJO JA, **Multiaxial fatigue life estimation based on combined deviatoric strain amplitudes**, Int J Fatigue, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.11.002>.
- MCCLAFIN, D., FATEMI, A. **Torsional deformation and fatigue of hardened steel including mean stress and stress gradient effects**. International Journal of Fatigue 26, 2004. 773-784 p.
- MILLER, K. J. and CHANDLER, D. C. **High strain torsion fatigue of solid and tubular specimens**, Proc. Insm mech. Engrs 1969-70 184,433-448.
- NADAI, Arpad. **Theory of flow and fracture of solids**. 2. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1950. v. 1. 347-349 p.
- PAPADOPOULOS IV, DAVOLI P, GORLA C, FILIPPINI M, BERNASCONI A. **A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals**. Int J Fatigue 1997;19:219-35.
- SINES, G., **Behavior of Metals under Complex Static and Alternating Stresses** in Metal Fatigue, G. Sines and J.L. Waisman. Eds., McGraw Hill, 1959, 145-169.
- SMITH, R. N., WATSON, P., and TOPPER, T. H., **A Stress-Strain Parameter for the Fatigue of Metals**. Journal of Materials, Vol. 5, No. 4, 1970, 767-778.
- SOUZA, S.A. de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5ª ed. São Paulo, Edgar Blücher, 1982.

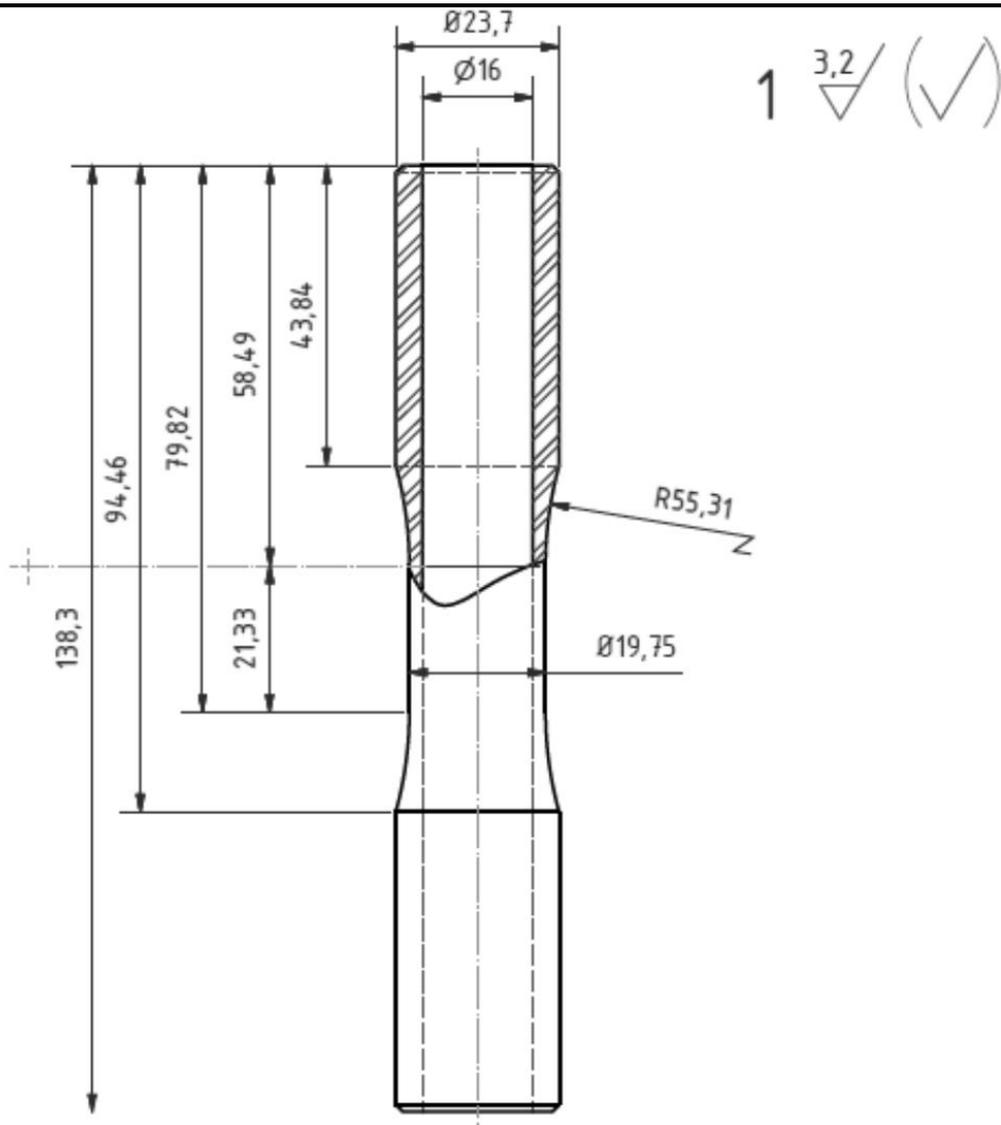
# ANEXOS

Pág.

Anexo I	Desenho Técnico do Corpo de Prova tubular de diâmetro de garra de 12 mm	52
Anexo II	Desenho Técnico do Corpo de Prova tubular de diâmetro de garra de 23.7 mm	53
Anexo III	Desenho Técnico do Corpo de Prova de seção cheia e diâmetro útil de 10 mm	54
Anexo IV	Desenho Técnico do Corpo de Prova de seção cheia e diâmetro útil de 6,5 mm	55

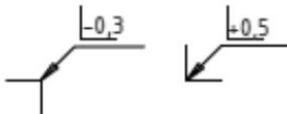
ANEXO I: Desenho Técnico do Corpo de Prova tubular de diâmetro de garra de 12 mm





NOTAS

1. Chanfros não indicados 1x45°.
2. Raios não indicados R0,5.
3. Canto simplificado conforme DIN 6784.



4. Tolerâncias lineares e angulares gerais não indicadas conforme NBR ISO 2768-mK.
5. Ajustes conforme ISO 268.
6. Estado de superfície segundo NBR 8404.



